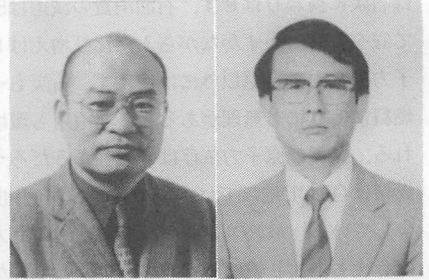


■ 展 望・解 説 ■

パルスパワー科学技術の 開発とその将来(II)

—液体状態とその電気特性に関する
NATO高等専門家会議に参加して—



Prospect of the Pulsed Power Science Technology (II)

NATO Advanced Study Institute Entitled on The Liquid State and Its Electrical Properties

上 野 勲*・酒 井 洋 輔**

Isao Ueno

Yosuke Sakai

1. はじめに

液体技術は、これまで高圧電気絶縁や、高エネルギー粒子ディテクターのターゲット材料技術と関連して電気工学、原子核や放射線工学の分野で欠くことの出来ないものであった。また、近年慣性核融合を目的とした高エネルギービーム発生技術や微細パターン形成用高輝度X線発生技術の必要性が高まっているが¹⁻³⁾、これらのパルスパワー発生装置（本技術の本質は、大きなエネルギーを時間的・空間的に極めて小さな領域に圧縮・集中することにある）に用いられる波形成形及びエネルギー圧縮用コンデンサの誘電材料として、絶縁破壊が生じて自己回復可能な液体誘電体が注目されてきている。特に、水は誘電率が大きく絶縁耐力も大きいので、この技術にとって現在最も有望なものとして取り上げられ、これの電気的特性を解明する研究が盛んに行われている^{4,5)}。更に将来には、電気化学、静電気工学、バイオ、医学、等の分野で電界液、帯電液体、生体液体、ゲル等の各種液体を用いた応用技術が考えられ、これらの液体中の電子、イオン、及び光子の状態並びに諸特性を明らかにすることが重要になってきている。

以上のような状況のもとで、今回、NATO高等専門家会議(Advanced Study Institute)は、パルスパワ

ー関連技術の基礎研究の一貫として「液体状態とその電気特性(The Liquid State and Its Electrical Properties)」と題する会議を開催した。幸にして、筆者らもこの会議に参加し論文発表する機会を得たので、この間多くの講演並びにポスター発表を通じて得た、この分野の研究動向について報告する。

この会議は北大西洋条約機構(NATO)の科学委員会議が主催するもので、そのプログラムはその時代に大きく問題になってくる課題を取り上げ、ユニークで貴重な公開討論の場として1959年来続けられてきている。会議の目的は英国における個別指導性(Tutorial System)を導入した、高度な専門的講演を主体に、質の高い情報交換、意見交換、アイデア・経験の交換の場を提供し、国際的レベルの専門家同志の交流を深めさせることにより、研究水準の向上、深化を計ることにある。その期間は通常2週間で、総定員数は会議の実質的効果を考えて講師を含め60~100名と限定されている。会議録は今日では有名になっているNATO ASIシリーズとして専門分野別に公表されている⁶⁾。

2. 「液体状態とその電気特性」会議

今回の会議の主たる目的は、パルスパワー技術の心臓部にも当るエネルギー圧縮用コンデンサの新液体誘電材料の開発、並びに近い将来期待される液体関連技術の開発を前提とし、液体の基礎を理解するためにその状態とその中の電子、イオン、光子を含む諸特性を討論することであり、これには電気工学上重要な電気的破壊、その前過程、及び電子の伝導等をも含む。

会議の内容は、付録1にも示すが、液体構造の理論、

* 東京大学工学部強力中性子源開発研究グループ
プロジェクトリーダー

〒113 東京都文京区本郷7-3-1 電気工学科内

** 北海道大学工学部電気工学科助教

〒060 札幌市北区北13西8

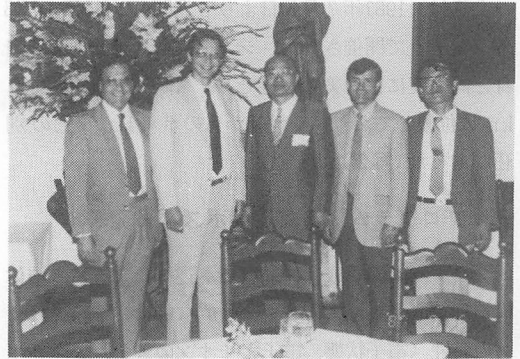
表1 国別登録参加者数と参加国

国名	米	カ	イ	フ	西	オ	ス	ベ	ポ	イ	ギ	ト	イ	日
参加者の分類	ナ	リ	ン	イ	ン	イ	エ	ウ	ル	タ	リ	ス	ラ	ス
	国	ダ	ス	ス	ダ	ス	ン	ル	ア	ア	コ	ル	本	
組織委員	5				1								1	
講演者	9	3	1	2	1		1					1		1
その他参加者 (ポスター発表者を含む)	27	2	1	2	2	1	2	3	2	3	1	4	3	
非加盟国招待者														2 2
合計82名(小計)	41	5	2	4	4	1	3	3	3	4	1	4	3	2 2

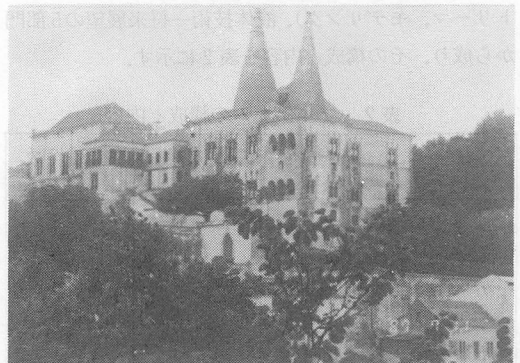
イオンと電子過程，界面現象，電氣的破壊と電子・イオン伝導，液体応用技術とその将来，に関する講演と，二回のポスターセッションからなっている。各テーマでは，現在第一線で活躍している数名の講師による1時間程度の招待講演が，単原子分子から成る構造の極く簡単な液体から炭化水素，水，TMS，電解質溶液，バイオ液体（ゲル等）等に到る多くの液体について行われ，また活発な質疑討論及び意見交換がなされた。この会議はフォーマルなものではないために，出席者の顔ぶれにより，また会議の進行状況に応じてプログラムが変更され，参加者の実質的な利益が大きくなるように配慮されていた。

参加者の専門分野は，会議の内容からも推察されるように理論物理，放射線化学・物理，電気工学等幅が広い。また，国別の参加者数は表1に示すように，米国が圧倒的に多い。NATO主催の会議の性格上，我が国からの参加者は少なく，筆者ら二名のみが招待された（写1）。

会議で取り上げられたテーマの内，電気工学上今日最も重要なものは，パルスパワー装置のエネルギー圧縮用コンデンサ誘電体材料の開発にある。安定動作，コンパクト化の点から見て，この材料の理想は，誘電率並びに絶縁耐力が大きく，かつ周波数特性が良いことである。これらの要求を満たすものとして，現在水が取り上げられており，これの加圧下における絶縁破壊特性を始めとし，水にエチレングルコールやエチルアルコール等を混合し凝固点を水の0℃より下げ，電気特性の向上を計ろうとした研究が主として米国から発表された。特に，MITのM. Zahn氏はカー電気光学効果（Kerr Electro-Optic Effect）を用いた誘電体中の空間電荷分布の測定方法について紹介した後，この方法を用い電極間の空間電荷電を観測し，



写1 組織委員と筆者等（左から Christophorou, Kunhardt, 上野, Luessen, 酒井）



写2 シントラ王宮

電極材料の種類と水中に注入される電荷の種と量の関係について報告した。例えば，（SUS正極/AI負極）電極系では，正負電極からそれぞれ正負電荷が水中に注入され，その結果電極近傍電界が緩和されるため，水の絶縁耐力の上昇することを示した（詳細は付録2に記す）。

この会議は，先述のように NATO 科学委員会が主催，他に米国海軍研究所，ロスアラモス国立研究所，並びに米軍の電子技術とデバイス研究所の共催で開かれた。会議の企画は，既に何回も NATO 高等専門家会議を企画組織運営をしてきた L. H. Luessen 氏（IEEE，パルスパワー部門の運営委員），E. E. Kunhardt 氏（ニューヨーク工芸大教授；パルスパワー科学技術），L. G. Christophorou 氏（オークリッジ国立研究所；気体並びに液体絶縁技術）の三氏により行われた。組織委員としては，他に地元ポルトガルから A. J. Policargo 氏（コインブラ大教授；高エネルギー粒子計測用ターゲット液体の開発研究），西独の W. F. Schmidt 氏（ハーン・マイトナー原子核研究所；高エネルギー粒子計測用ターゲット液体の開発，並びにガス・液体絶縁技術）等が加わった。

会議は、1987年7月5日より2週間、リスボン市郊外シントラで開催された。シントラは、ポルトガル自身と同程度に古く美しい町で、リスボンの北西約40kmに位置しており、6世紀からのポルトガル王の別荘があった(写2)。

3. プログラム、講演及びポスター発表

プログラムの構成は、前章でも述べたように、液体構造理論(乱れた系の表現、動的な特性)、電子とイオンの特性(電子状態、電子とイオンの運動、エネルギー緩和、気体-液体遷移)、界面現象(電荷注入、エネルギー交換)、伝導と破壊(基礎過程、高電界輸送、ストリーマ、モデリング)、液体技術-将来展望の5部門から成り、その構成と内容を表2に示す。

表2 プログラムの構成と内容

課題	内容	講演時間(時間)	講演件数(件)
液体構造理論		6	4
電子・イオン特性		16	10
界面現象		6	4
伝導と破壊		12	9
液体技術・将来展望		3	1
ポスター		6	29
合計		49	57

第1日と第2日目は液体構造の表現(液体を構成する粒子系は、希薄気体中のように完全にランダムな質点系と異なり、他方、固体のような整然とした配列でもないために、その数学的表現が難しい)について、また粒子間ポテンシャルから拡散係数等の熱力学的パラメータを与える方程式等について解説後、討論がなされた。尚、各講演者並びに講演題目は付録1に示す。

第3日から第5日にかけては、電界液中のイオン、各種誘電液体中での電子状態と電子局在化の条件等を与える理論、及び低電界から破壊付近の高電界までの広い電界範囲(電子のエネルギーに換算すると大凡10meV~100eV)に亘る電子伝導に関する諸特性が報告された。興味ある講演としては、ガス/液体間の相変化時における電子の等価散乱断面積の関係や、液体を光学的に励起したときの電子状態変化をレーザー光を用いフェムト秒(10^{-15} 秒)の時間スケールで観測したものがある。

W. F. Schmidt氏とG. Freeman氏は、液体誘電体の絶縁破壊機構を明らかにする上で基礎となる高電

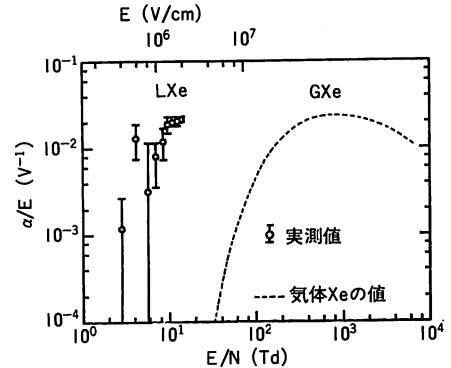


図-1 液体キセノンの電離係数 (α/E)

界下における電子伝導特性について講演した。構造の簡単な液化ガスにおいても種類によって、電子は準自由な状態をとるもの(液体アルゴン、クリプトン、キセノン、メタン)、あるいはイオン(液体窒素)や電子性バブル(液体ヘリウム、ネオン)⁷⁾として局在化されるもの等があり、これら電子の特性は液温、密度、電界強度等によっても変化することが解説された。特に、液体キセノン中では破壊電界近傍の高電界においては、液体の電子的破壊説を裏づける電子なだれが観測され、電離係数が図-1のように与えられる。

第6日目には、溶媒と溶質間、液体と蒸気間、液体と金属界面において生ずる電気的性質に関する解説及び討論があり、また、2章で述べたように、Zahn氏によりカー効果を利用した液体中の空間電荷分布の測定法と、この方法を用いて電極から水中に電荷が注入されたときの空間電荷分布を測定した例が報告された。

第7日から第9日には、液体中の電子伝導から破壊に到る基礎過程を電極状態並びに電子注入と関係づけて解説された。また、気体中のストリーマ理論と同時に液体中でのストリーマ進展過程、及びその進展機構が多くの条件に対して、更に、無極性から有極性まで多くの液体中での電子伝導機構について討論された。

最終日には、西独のW. F. Schmidt氏が座長を務め、液体の工学的応用の現状と将来について、パネルディスカッションが持たれた。まず座長が下記の6種の応用技術について解説した後、意見交換があった。

1. 高電圧絶縁: 液体(水)コンデンサー、トランス、開閉器、ケーブル、放電ライン・・・
2. 静電機器: 高電圧発生、ハイパワー・・・
3. 石油産業: オイル中の水、流動帯電、腐食・・・
4. キャピテーション、霧吹き作用、電食: 水中スパーク、音ルミネッセンス、静電スプレー、帯電エ

アロゾル, 静電的相分離, 電食による金属フォーミング・・・

5. 磁気流体: 電気-光学液体・・・
6. 放射線ディテクター: 線量用液体ディテクター, 高エネルギー物理や γ 線量計, 医療イメージングデバイス・・・

討論で話題に上ったトピックスをキーワードにすれば、——薄膜トランジスター, 新液晶, 液体レーザ, 帯電, エネルギー蓄積, ソーラー誘電液体, パルス圧縮, 医療応用, 生化学への応用(蛋白質, コロイド液体, ゲル)等——。

以上述べた講演のうち, 液体中の電子過程, 電気的破壊, ストリーマを扱ったテーマにおいては, 筆者らの仕事も含め日本人による研究成果も数多く引用されると同時に紹介もされ, この分野での日本における研究が評価されたものと感じられた。

最後にポスターセッションについて述べる。寄稿論文(29件)は全てポスターとして扱われ, これらを二つ(ポスターAとB)に分けて発表された。ポスターの内容は, 会議の性格上基礎的なものが多かったが, パルスパワー技術に関連したもの, 即ち高度に純化した水, 及び水とエチレングリコール混合液体の加圧下における絶縁破壊特性, 誘電率の温度と周波数特性, 等の研究成果が5件発表された。筆者らの一人(酒井)も液体の絶縁破壊や伝導の基礎となる液体中への紫外光による電子注入過程について発表したが, 持ち時間2時間の間, 一分の休みも取れないなど質問討論があり, ポスターも講演同様活発に行われた。

4. おわりに

この分野の国際会議としては, 2年毎開催されるIEEE Pulsed Power Conferenceの他に放射線化学関係の会議や3年毎に開催されるICDL(International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids), 及び応用分野に限るがISH(International Symposium on High Voltage Engineering)があり, テーマの一部を同じくしている。

今回, NATO ASI会議に参加し, その活動をつぶさに体験する機会に恵まれ, パルスパワー技術に関連して液体の持つ重要性を具体的に知りえたと同時に, 同分野の研究者と十分討論する機会を得たこと, また他専門分野の研究者と知り合い, 相互の知識を交換することができたことは, 極めて有意義であった。

以上, NATO ASI液体状態とその電気特性に関する会議のあらましを紹介した。更に, 詳細な専門的学術的内容に興味のある各位に対しては, 近く Plenum Publishing Corp. より出版されるNATO ASIシリーズB) Physics series に, 本会議の Proceedings が掲載される予定である。

参考文献

- 1) 上野; エネルギー・資源, 5巻1号, (昭和59年) pp.16-22
- 2) 上野; 同上同巻2号, (昭和59年) P. 103-110
- 3) 上野; 同上, 8巻2号, (昭和62年) P. 119-124
- 4) 小畑, 上野, 他; 電気学会論文誌, 103-B巻12号, (昭和58年) P. 821-828
- 5) M. Zahn, et al; Proc. IEEE, Vol. 74, No. 9, (1986) P. 1182-1221
- 6) 生命科学(A)と物理(B)シリーズ Plenum Publishing Corp., 数学物理科学(C)シリーズ Reidel Publishing Company 行動社会科学(D)と応用科学(D)シリーズ Nijhoff/ Noordhoff International Publishers BV
- 7) Y. Sakai, et al; J. Electro., Vol. 12, (1982) P. 89-96

付録 1

第1～第2日目(液体構造理論)

多原子からなる液体とその相関関数, 溶媒和電子の幾何学的予測; D. Chandler (米, カリフォルニア大化学科教授)

流体の平衡特性; D. McQuarrie (米, カリフォルニア大化学科教授)

液体中のダイナミック過程の理論; J. B. Hubbard (米, ゲイサースバーグ国立研究所熱物理部門)

液体中の超高速光異性化のダイナミクス; K. B. Eisenthal (米, コロンビア大化学科教授)

第3～第5日目(イオン及び電子過程)

電解質溶液(極性液体)の構造; J. Rasaiah (米, メイン大化学科教授)

極性液体のイオン・電子のダイナミクス; J. Hubbard (米, ゲイサースバーグ国立研究所熱物理部門)

液体中の電子状態, 局在化の理論; N. Kestner (米, ルイジアナ州立大化学科教授)

フェムト秒(10^{-15} 秒)オーダの電子局在化と非線形光学応答; G. A. Kenny-Wallace (加, トロント大化学科教授)

無極性液体中の電子キネテックス; R. A. Holroyd

(米, ブルックヘヴン国立研究所化学部門)

液体の光伝導, 伝導帯, エキシトン; I. Steinberger

(イスラエル, ヘブライ大物理学科教授)

液体中の電子散乱と移動度; G. R. Freeman (加, アルバート大化学科教授)

高電界電子移動度と電子附着; W. F. Schmidt (西独, 本文2章参照)

気相/液相遷移; L. Christophorou (米, 本文2章参照)

第6日目 (界面現象)

第2調波発生による液面の研究; K. B. Eisenthal (米, コロンビア大化学科教授)

誘電液体中の空間電荷効果, 電気流体学稿; M. Zahn (米, マサチューセッツ工大高電圧部門教授)

第7~第9日目 (破壊と伝導)

破壊と伝導の概観; T. J. Lewis (英, 北ウェールズ大教授)

液体中の破壊進展の基礎過程; W. F. Schmidt (西独, 本文2章参照)

発生学的破壊問題; E. E. Kunhardt (米, 本文2章参照)

高密度状態における原子・分子時間スケール; G. A. Kenny-Wallace (加, トロント大化学科教授)

液体誘電体中のストリーマ; R. Tobazeon (仏, グルノーブル工大教授)

破壊の測定/探針; R. E. Hebner (米, ゲイサーズバーグ国立研究所システム部門)

フラクタル+誘電破壊; H. R. Zeller (スイス, BBC研究所マネジャー)

誘電液体中の電気伝導; J. P. Gosse (仏, グルノーブル大教授)

第10日目 (液体技術の展望)

液体状態とその電気的特性の研究—応用—; W. F. Schmidt (西独, 本文2章参照)

付録2

最近の典型的なパルスパワー装置は, 図-2で示されるが, このうちのパルス形成部 (エネルギー圧縮コン

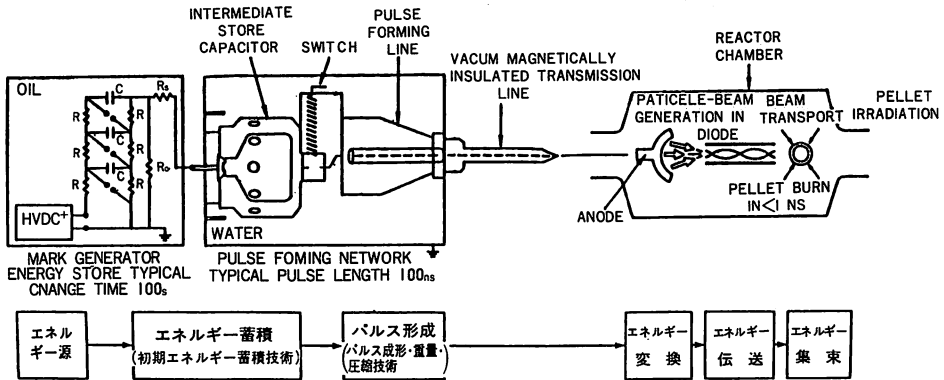


図-2 典型的なパルスパワーシステム

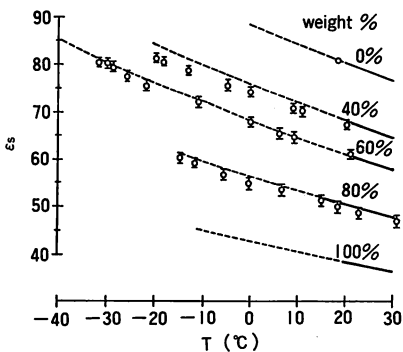


図-3 水/EG混合液体の比誘電率 ϵ_s と液温の関係 (EGの重量%をパラメータ), 周波数 0.5~108 MHz間で測定

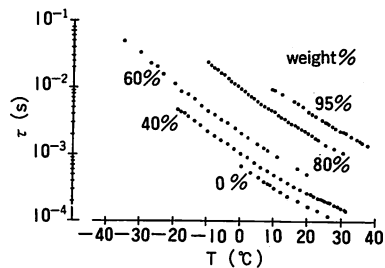
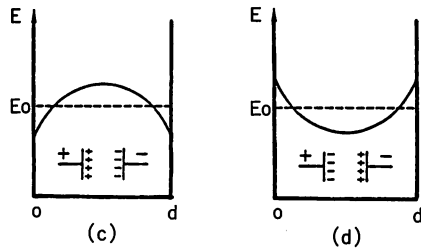
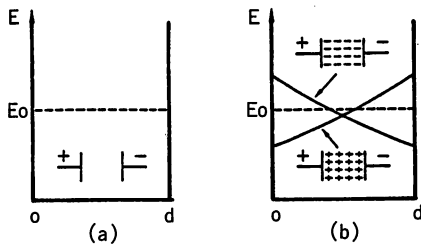


図-4 水/EG混合液体の固有時定数 τ と液温の関係 (EGの重量%をパラメータ)

表3 水/GE混合液体の破壊電界 E_m と最大蓄積エネルギー W_m

G/E重量比 (%)	T (°C)	E_m (MV/m)	W_m (kJ/m ²)
0	0	13	66
40	25	16	76
	-11	16	90
60	30	16	66
	-23	14	67
80	25	21	96
	-10	17	77
95	28	27	129



- (a) 注入電荷無し
- (b) 正または負の単一電荷の注入
- (c) 電極極性と同種電荷の注入
- (d) 電極極性と異種電荷の注入

図-5 電極からの電荷注入による空間電荷分布

センサー、スイッチ、及びパルス形成ライン)の誘電材料として、現在主として高度に純化した水が使われている。本目的の誘電材料には、蓄積エネルギー密度を上げると同時にパルス形成ラインを短くする立場から、比誘電率 ϵ_s 、絶縁耐力 E_m 並びに固有時定数 τ ($=\epsilon_0 \epsilon_s \rho$; ρ は抵抗率)の大きいものが望ましい。 τ は内部電界を維持できる時間(水を含む極性液体は僅かではあるが電離しているため、電導により電界が低下する)を示す指標であり、またこれを用いて蓄積エネルギー W_{st} と抵抗損 W_{oh} との比(効率)が、

$$W_{oh}/W_{st} = \alpha(t_c/\tau)$$

と与えられる。ここで、 t_c は充電時間、 α は比例定数

表4 電極材質に依存して生ずる空間電荷分布の種類(図-5に対応)と破壊電界 E_m

空間電荷分布の種類	電極材質		E_m (MV/m)
	-極	+極	
(a)	SUS	Al	10.5
	銅	Al	11.0
(b) 正電荷	SUS	SUS	11.9
	SUS	銅	11.0
	銅	銅	13.5
	Al	Al	11.2
	真ちゅう	銅	11.3
	真ちゅう	Al	9.2
(c)	Al	SUS	13.0
	銅	SUS	11.7
	Al	銅	~10.3
	銅	銅	12.3
	銅	真ちゅう	11.5
	真ちゅう	SUS	11.6
	SUS	真ちゅう	12.5
	Al	真ちゅう	12.7

で0.5と1間の値。高度に純化した水($\epsilon_s \sim 80$)の E_m は >10 MV/m、効率 $\sim 90\%$ ($t_c = 100 \mu s$)である。

一方、水/エチレングリコール(EG)混合液体の ϵ_s は室温で水より低下するが、凝固点(水より下がる)付近では水同様 ~ 80 であり(図-3)、 E_m は $t_c \sim ms$ で >17 MV/mに増加し、その結果最大蓄積エネルギー $W_m (= \epsilon_0 \epsilon_s E_m^2 / 2)$ が大幅に上昇する(表3)。更に、 τ が上昇することにより(図-4)、 W_{sh}/W_{st} も増加する。水/EGの E_m は表3からEGの増加とともに上昇することが分かる。 E_m の値は、電極材質にも依存することが知られている。

Zahn氏は、カー電気光学効果を利用して、電極から水中に注入される電荷による空間電荷を測定し、空間電荷の種類並びに分布と絶縁耐力の関係を与えた。空間電荷の分布は、電極材質に依存して図-5に示す4種のもが現われ得る。それぞれについて、電極材質と E_m を表4に示す。真ちゅう/Al電極系ではホモ電荷が注入される極性にとると E_m は12.5~13.5 MV/mであるものが、極性を逆にすると負電荷が注入され、 E_m は9~9.5 MV/mに低下している。これは、電極近傍で空間電荷による局所電界が大きくなり破壊しやすくなること、即ち破壊は電極界面から生じることを意味している。