液体窒素中の熱気泡トリガー絶縁破壊に 与える絶縁フィルムの影響

学生員 高野 浩二 (九州大学) 学生員 松浦 俊輔 (九州大学)
 学生員 江 岩 (九州大学) 正員 末廣 純也 (九州大学)
 正員 原 雅則 (九州大学)

Effect of a Thin Insulation Film on Thermal Bubble-Triggered Breakdown Phenomena in Liquid Nitrogen

Koji Takano, Student Member, Shunsuke Matsuura, Student Member,
 Jiang Yan, Student Member, Junya Suehiro, Member, and Masanori Hara, Member
 (Kyushu University)

Effect of a thin insulation film on breakdown phenomena in liquid nitrogen in the presence of thermally induced bubble is investigated with a cylinder-to-plane electrode. Bubbles were produced by a heater mounted in the cylinder which is partially covered with an insulation film. The results show that the effect of film on the breakdown voltage is little till a pore is formed on the film by a previous breakdown, but it becomes very severe after the pore formation. The reduction rate in breakdown voltage after the pore formation depends on the gap length and heater power. The minimum breakdown voltage reaches down to the gaseous one at normal boiling temperature. Breakdown mechanism is discussed on the basis of bubble observation and numerical calculation of suspended-bubble motion.

キーワード：液体窒素、気泡、電気絶縁、絶縁破壊

1. まえがき

近年、液体窒素を冷媒として用いる高温超伝導電力機器の開発が、各地で進められている。特に、電力ケーブル⁽¹⁾や変圧器⁽²⁾等は試作器が製作され、実用化を目指して検討が進められている。

これらの高温超伝導機器において、高耐電圧化は電流密度の増大とともに、検討すべき必須の課題である。特に浸漬冷却超伝導コイルのクエンチ時には、ホットスポットの付近に高電圧と、絶縁耐力の低い熱気泡とが同時に出現する状況が考えられる。このような状況は電気絶縁の観点からは極めて厳しいものとなる。この事に関して、筆者らは裸モデル電極を用いて、気泡挙動や絶縁破壊機構について一連の研究を行ってきた⁽³⁾⁻⁽⁹⁾。また、大久保らは、実際のコイル環境に近い電極条件でクエンチを起し、絶縁破壊の過渡現象の検討を行っている⁽¹⁰⁾。

ところで、実際の超伝導機器の絶縁構成は、冷媒液体以外にも広い温度範囲の蒸発ガス、真空、固体、ならびにそれらの複合系から成る。なかでも超伝導線が直接スペーサや絶縁テープなどの固体に接触する場合には、それらの存在によって熱気泡の発生状況や電界分布に変化が生じることが考えられる。本研究では、絶縁フィルム被覆が気泡挙動と絶縁破壊に与える影響について検討を行い、いくつかの新しい知見を得ることができた。

2. 実験装置と方法

実験装置の全体図を図1に示す。熱絶縁系は以前から用いているものと同じで、2層のデュワーを使用しているため、外部からの熱侵入はほとんどない。使用液体は商用の液体窒素であり、大気圧下の沸騰温度とした。使用電極は図2に示すような円筒対平板電極であり、円筒電極内には超伝導コイルのクエンチ時のジュール発熱を模擬するために、中央部分にヒータを埋め込んである。絶縁フィルムの影響を調べるため、厚さ $80\mu\text{m}$ 、幅 2.5mm のカプトンフィルムを、円筒電極の円周に沿って、エポキシ樹脂で接着した。その際、カプトンフィルムの端からはみ出したエポキシ樹脂は、研磨剤などにより可能な限り取り除いたが、わずかに残り裾野を形成している。実際の超伝導コイルにお

図1 実験装置

Fig.1. Experimental setup.

図2 電極系

Fig.2. Electrode system.

ける絶縁距離を考慮して、ギャップ長 g は0.5~2.0mmの間で変化させた。ヒータを持たない平板電極に直流電圧を印加し、種々の特性を議論する場合の極性は円筒接地電極のそれによって表した。破壊電圧は電圧上昇率を約1kV/sとして測定した。図2に示すように、主として容器壁と超伝導線を模擬して平板対円筒電極系の軸を横に配置した。以降の実験および考察は、主に円筒電極を水平にした場合について行ったが、必要に応じて垂直にした場合のデータも示した。以下において特にことわらない限り、円筒電極は水平に配置したものとする。

ヒータパワーは $H=(\text{ヒータ入力})/(\text{ヒータ長})$ で表し、特に核沸騰開始の H は H_0 として表した。本実験系の場合、 H_0 は電極表面の研磨、絶縁テープの張替、埋込ヒータの交換の都度多少の変化があった。そこで本研究では、気泡挙動と破壊特性を論じる場合、沸騰の強さを表すパラメータは H を H_0 で規格化し、 H の小さい領域の特性がより拡大して示せるように平方根を取って $\sqrt{H/H_0}$ と表した。

気泡挙動は実体顕微鏡とCCDカメラを通してビデオに録画し、必要に応じてプリンターで出力した。また、沸騰開始の時点では、裸電極の場合には設置したヒータの周りに、フィルムを貼った場合にはフィルム端の周りに、気泡発生の活性核が不均一に分布していた。その分布は電極の設定毎に多少変化するが、本研究では沸騰開始時点で少なくとも破壊を起こし易い最短ギャップ付近に気泡発生の活性核のあるものを使用した。

3. 実験結果

<3.1> 気泡挙動 フィルムなしで $g=2\text{mm}$ および0.5mmの場合の気泡挙動をそれぞれ図3と図4に、またそれぞれのギャップ長での破壊電圧付近の最短ギャップの様子を拡大したスケッチを図5に示す。なお、気泡挙動に対する極性効果は小さかったので、本研究では後に述べるように、破壊電圧の低い負極性のデータを図示した。これらの図から、以前報告したように⁽⁶⁾⁽⁸⁾、次の事が認められた。

(1) H_0 付近のヒータパワーが比較的小さい場合、電圧を印加することで円筒表面の冷却が促進され、気泡発生が電圧上昇の途中で観測されなくなる。また、電界による冷却

図3 フィルムなしの電極間の気泡挙動($g=2\text{mm}$)

($\sqrt{H/H_0}=2.1$, $H_0=0.15\text{W/mm}$, 負極性)

Fig.3. Bubbles without insulation film at $g=2\text{mm}$. 図4 フィルムなしの電極間の気泡挙動($g=0.5\text{mm}$)

($\sqrt{H/H_0}=2.1$, $H_0=0.15\text{W/mm}$, 負極性)

Fig.4. Bubbles without insulation film at $g=0.5\text{mm}$.

図5 最短ギャップ付近の気泡のスケッチ

Fig.5. Enlarged sketch of shortest gap region.

促進効果と気泡に作用するマクスウェル応力の効果で気泡が離脱時に長く伸び、気泡半径が電界によって小さくなる。

(2) 図3(b)、図4(a)に示すように、破壊電圧に比べ低い電圧で、浮力とグラデーション力の釣り合う気泡の滞留位置(浮力と電界グラデーション力の垂直方向成分が平衡する位置)において、集塊した気泡による電極間の橋絡が発生する。

(3) 破壊電圧近くの高い電圧では、滞留位置は最短ギャップから遠い下方へと移動し、図3(c)、図4(b)に示す

ように、集塊していた大きな気泡は細かい気泡の集合へと変化する。

(4) 高い電圧が印加されている時、最短ギャップでは気泡表面に作用するマクスウェル応力が大きくなり、図5(a)に示すように、歪んだ気泡が観測される。特にギャップの短い場合には、図5(b)に示すように、変形して筋状に伸びギャップ間を橋絡する気泡が観測される。実際に絶縁破壊が発生するのは、図3(d)に示すように、この部分からとな

る。

(5) 破壊電圧近くの高い電圧が印加されている時、ある気泡発生活性核から連続して気泡が発生する場合には、気泡が連なる様子が見られる。特に最短ギャップ付近では、円筒電極表面から真っ直ぐ平板電極の方に向かって気泡が運動するため、ギャップ間を気泡が断続的に橋絡する様子が観測される。

以上の実験結果は、すでに報告した気泡挙動の理論的検討結果とよく一致する(7)(9)(11)。

以上のような観測を多数行い、得られた $g=2\text{mm}$ の場合の気泡挙動の観測結果をまとめたものが図6(a)である。図中の"Gradient force dominant"とは、電極の下部より発生した気泡が、グレイディエント力に従い下方へと運動する様子が観測されたことを示す。また、"Formation of vapor locking"とは、滞留位置で気泡の橋絡が観測されたことを示す。その電圧は破壊電圧よりもかなり低く、この気泡の橋絡が直接破壊の経路とならないことが分かる。

フィルム有りの場合の気泡挙動を図7に、その特性をまとめたものを図6(b)に示す。円筒電極上にカプトンフィルムを貼り付けても、絶縁破壊による放電痕がフィルム上に

図6 気泡挙動特性($g=2\text{mm}$ 、負極性)

Fig.6. Region of characterized bubble behavior for $g=2\text{mm}$.

図7 フィルム有りの電極間の気泡挙動($g=2\text{mm}$ 、負極性)

Fig.7. Bubbles with insulation film at $g=2\text{mm}$.

図8 フィルム上の放電痕

Fig.8. Pore formed on the film.

形成される前は、孤立気泡挙動に対するフィルムの影響は比較的小さかった。また、沸騰の開始されるヒータパワー H_0 についても影響は少なかった。しかし、気泡発生活性核はフィルムの両端に集中するようになった。さらに、フィルムなしの電極の場合と違い、図7(a)、(b)に示すように、電圧を印加することで気泡半径が大きくなった。このため、気泡滞留位置での橋絡は、フィルムなしの場合より小さいヒータパワーで発生した。

一方、フィルムを貼り付けた場合には、ギャップ長が長ければ、絶縁破壊により容易にフィルム上に図8に示すような放電痕を生じる。もしフィルム上に放電痕が生じれば、その場所は気泡の発生核になり易い。放電痕で発生した気泡は、印加電圧がある程度高い値になると、気泡の根元の移動が放電痕の境界部分に阻止されるので、平板電極の方向へと伸び易くなる。その結果、図7(d)に示すように、 $g=2\text{mm}$ の長いギャップにおいても最短ギャップ領域での気泡の橋絡が容易に発生した。図6(c)には、橋絡の発

図9 円筒電極を垂直にした場合の気泡挙動($g=1\text{mm}$)

Fig.9. Bubbles with vertically cylindrical electrode at $g=1\text{mm}$.

図10 円筒電極を垂直にした場合の気泡軌跡のシミュレーション
(24kV , $g=2\text{mm}$, $r_b=0.08\text{mm}$)

Fig.10. Simulation of bubble motion with vertical electrode at $V=24\text{kV}$.

生開始が観測された電圧を×印で示した。この電圧は破壊電圧よりもかなり低く、電圧を上昇させても破壊電圧に至るまで、一旦形成された気泡橋絡は保持された。

円筒電極を垂直に配置にした場合の気泡挙動の様子を図9に示す。また、垂直にした場合の気泡の軌跡を以前と同じ仮定⁽¹¹⁾のもとで数値計算により求めた結果を図10に示す。これらの結果より、次のことが言える。グレイディエント力と浮力の釣り合うような気泡の滞留位置は存在しない。円筒電極表面から発生した気泡は、浮力の影響を受けつつ、グレイディエント力により最短ギャップから離れるような水平方向の力を受ける。このため、気泡は上向きに運動しつつ最短ギャップ領域を離れていく。

フィルムを電極上に貼った場合に放電痕が形成されていない状況で、特にフィルムの下の端から発生した気泡は、水平配置の場合よりも大きくなっていった。これは浮力による気泡の上方への運動が絶縁フィルムの端で妨げられるためと考えられる。また、これらの気泡は電圧印加によりさらに大きくなる様に見えた。その大きさは図10に示すように最短ギャップ付近のAの方がギャップの外側のBよりやや大きい。つまり、電界が強い程絶縁フィルムの端にひっかかった気泡が大きくなっており、これは平等電界中で絶縁物に運動が阻止された電界下の気泡の挙動観測結果⁽³⁾と同じ現象と考えられる。

また、フィルム上に絶縁破壊による放電痕が発生すると、水平配置の場合と同様に、気泡は放電痕の所にひっかかり、そこから成長して平板電極に向かい筋状に伸びる現象が見られた。ただし、 2mm のギャップを橋絡するほどには長くなることは少なく、安定な気泡橋絡は図9(b)に示すような 1mm 程度以下のギャップ間においてであった。

<3.2> 破壊電圧 図11にフィルムなし電極系で測定

図11 フィルムなしの電極でのヒータパワー対破壊電圧特性

Fig.11. Heater power vs. breakdown voltage without insulation film.

図12 破壊電圧の回数依存性

Fig.12. Dependence of breakdown voltage on breakdown times.

(a) Horizontally cylindrical electrode

(b) Vertically cylindrical electrode

図13 ヒータパワー対破壊電圧特性

Fig.13. Heater power vs. breakdown voltage.

したヒータパワー対破壊電圧特性を示す。それぞれのHで5回ずつ破壊電圧を測定し、そのバラツキを縦棒で示した。Hを上げていくと、気泡の発生が開始される H_0 で、破壊電圧の低下が始まり、ある電圧に落ち着く様子が見られる。また、破壊電圧の低下時にバラツキが大きく発生して

いる。

極性効果はギャップ長が長い方が大きく、また、いずれのギャップ長でも、負極性の破壊電圧の方が正極性の破壊電圧よりも低い。このため、以降の破壊電圧は負極性の値を示す。

また、ギャップ長が長い場合には、図12の例のように、フィルム有り電極系で破壊が発生すると以降の破壊電圧が大きく低下する。これは図8に示したような放電痕で成長する橋絡気泡の影響と考えられる。このため、絶縁破壊後に、破壊電圧が大きく低下した場合には、デューブ中の放電痕は外部から確認できないが、以降の特性では放電痕有りの場合として示す。

以上のような破壊電圧の測定を多数回行いまとめた円筒電極を水平に配置した場合のヒータパワー対破壊電圧特性の結果を図13(a)に示す。 H_0 に対する絶縁フィルムの影響を明らかにするため、ここではHの平方根の値を横軸に用いた。破壊電圧に対するフィルムの影響は、ギャップ長やフィルム上の放電痕の存在に依存する。ギャップ長が0.5mmと短い場合には、絶縁破壊は常に円筒電極上のフィルムのない部分で発生する。このため、破壊電圧はフィルムの影響をほとんど受けない。ギャップ長が長くなっても、フィルム上に放電痕がなければ、破壊電圧に対するフィルムの影響はほとんど見られない。しかし、ギャップ長が長くなって破壊電圧が高くなると、先にも述べたようにフィルムを貫通して絶縁破壊の発生する確率が上昇し、フィルム上に放電痕が生じると破壊電圧が急激に低下する。また、 H_0 も急激に低下し、この事により小さなヒータパワーで破壊電圧の低下が始まるようになった。

従来の研究によると、液体窒素中の平等および準平等電界下の破壊電圧測定値の下限は次式で近似される⁽⁴⁾。

$$V_B = 29 g^{0.8} \quad (\text{kV}) \quad (1)$$

フィルムなし、フィルムに損傷のない状況で、ヒータパワーのない場合の破壊電圧は、ギャップ長に関わらず、(1)式で得られる値と同程度である。一方、フィルムに損傷のある状況で、ヒータパワーの大きい場合はストリーマ理論(ST)から推定される窒素ガスの破壊電圧値⁽¹²⁾にかなり近づく。

円筒電極を垂直に配置した場合の破壊電圧特性を図13(b)に示す。この時、水平配置の場合とは異なり、 $g=2\text{mm}$ の場合には、放電痕が生じてヒータパワーが大きい場合においても、破壊電圧が窒素ガスの値まで低下することはなかった。これは、先にも述べたように、放電痕から発生し成長した気泡が2mmのギャップ長を橋絡するすることがまれであったためと考えられる。実際に1mmのギャップを橋絡する程度の気泡は容易に観測され、その場合には、窒素ガスの値まで破壊電圧が低下した。

4. 考察

4.1> 気泡挙動に与える絶縁フィルムの影響

電極表面からの気泡の発生、成長および運動に与える絶縁フィルムの影響因子は、3つに大別できる。第一は、フィルムによる電極と液体間の熱伝達阻止によりフィルム端での温度上昇が起これば H_0 が低下すると同時に、そこでの気泡サイズがフィルム無しの場合より大きくなることである。この気泡サイズのフィルムによる増大は、気泡運動に対する見掛け上の粘性効果の低減に繋がり⁽¹¹⁾、気泡挙動の活発化をもたらす。第二は、フィルム端の金属と絶縁物境界付近では気泡の電極沿面に沿った運動が妨げられやすく、特に円筒電極を垂直に配置した場合には上方への気泡の滑りを妨げる効果が顕著になることである。これらは、 H が同じ場合、気泡サイズを大きくするように作用し、第一の影響と結果的には同じになる。第三は、フィルム上に放電痕が形成されることによる沸騰の活性核の形成と放電痕の周りの境界における電極面に沿った気泡の滑り阻止効果である。これは、結果的には放電痕における気泡の安定な成長をもたらし、図7(d)の様な気泡橋絡に繋がる。

フィルムによる顕著な破壊電圧低下の原因という観点からすれば、この気泡橋絡の原因となるフィルム上での破壊による放電痕の形成条件を見いだすことが大切である。そこで、新たにフィルムの破壊電圧を先端半球状の棒対平板電極系にフィルムを挟んで調べた。その結果が図14である。これによると、負棒の場合電極先端の曲率にもよるが、破壊電圧は18~27kVの範囲にある。ここで検討している円筒対平板電極系のフィルム有り/無しにおけるギャップ長を変えた破壊電圧特性と放電痕の観察および図14より、液体の破壊電圧がフィルムの耐電圧を上回るようなギャップ長になると、フィルム上に放電痕が形成される確率が高くなることが認められた。

次に、円筒電極配置を変えた場合にフィルムの気泡挙動に与える影響がどのように変わるのかについて述べる。配置を垂直に変えると、浮力とグレイデント力が釣り合う位置がなくなり、孤立気泡ならびに電極に接触した気泡は常に上向きの力を受ける。これは、気泡の安定成長を阻止するように作用し、フィルム端や放電痕からの気泡橋絡が安定に維持されるギャップ長の減少に繋がり、<3.1>の観測結果とも一致する。

<4.2> 破壊経路と破壊機構 <3.1>で述べたように、裸電極で気泡橋絡が発生するにも関わらず、破壊が橋絡のない最短ギャップで起きるのは、先の報告の中で検討した⁽¹¹⁾ように、電圧が高くなるとグレイデント力が大きくなって橋絡形成位置が最短ギャップから遠ざかり、そこでのガス中の破壊電圧より最短ギャップの液中における破壊電圧の方が低いためである。

さらに、裸電極の時は変形気泡と液体の混在した複合絶縁系の破壊になり、ヒータパワーが大きくなるに従って気泡の割合が大きくなって破壊電圧が低下する。フィルム有り放電痕が形成された場合には、放電痕から成長する気

泡がギャップを橋絡し、ヒータパワーが大きくなるとこの橋絡気泡の径が大きくなるとともに気泡内のガス密度が低くなって破壊電圧が低下するために、破壊電圧はヒータパワーとともにガス中の値まで低下したものと考えられる。

ところで、Krasuckiの理論⁽¹³⁾を用いて平等電界中の孤立球形気泡を仮定して図5の電界条件下で気泡の変形率を推定すると、長軸と短軸の比が1.1~1.3程度となる。これは図5に示した筋状の気泡の変形率よりも明らかに小さい。これは、特に図5(b)のような筋状の気泡形成は、Krasucki理論の「平等電界の球状気泡」の仮定がくずれ、気泡成長時におけるマッシュルーム状の長い気泡⁽¹⁴⁾にマクスウェル応力が作用した結果、気泡の変形が促進されたことによると考えられる。

さらに、破壊機構と熱気泡存在下での破壊電圧の大きなバラツキの原因を解明するために、破壊電圧の確率密度分布の計測を行った。その結果を図15に示す。この場合、それぞれのヒータパワーで50回程度の破壊を測定している。いずれのギャップ長や極性においても、ヒータパワーの増加による破壊電圧の低下が著しい領域で2つの分布の重なりとなった。これは、気泡挙動と密接に関係している。すなわち、沸騰開始付近では、電界印加による冷却促進により電圧上昇途中に沸騰が止んだり、気泡が最短ギャップから突然に吹き払われたりする現象が出現した。図6で、自然対流を起こすヒータパワーが印加電圧とともに大きくなっているのはこの電界による冷却促進効果の表れである。観測によると、最短ギャップ領域から気泡が突然吹き払われる現象は確率的なもので、電圧印加前に予測できるものではない。その根本原因は電界にあるが、これが液体の運動にどのように作用して吹き払い効果が現れるのかについては今後の研究を待たなければならない。この吹き払い効果が現れて最短ギャップ領域に気泡がなくなる場合には、図15の二つの瘤を持つ分布の高い破壊電圧側のデータとなり、破壊まで気泡が存在すると低い破壊電圧側のデータとなる。ヒータパワーが大きくなるに従い、吹き

図14 半球対平板電極における絶縁フィルム耐電圧特性

Fig.14. Breakdown voltage of tested film measured with a semi-spherical capped rod-to-plane gap.

払い効果の出現確率は低くなり、破壊電圧はガス中の値に近づく。

<4.3> 破壊特性に与える絶縁フィルムの影響

絶縁フィルムが破壊電圧に与える影響因子は、2つに大

図15 フィルムなし電極における
破壊電圧の確率密度分布

Fig.15. Breakdown voltage density distributions at different heater power for negative polarity with bared cylinder.

別できると考えられる。一つは、フィルムの存在による電界歪み、もう一つは気泡挙動への影響を通しての因子である。これらを破壊特性上で完全に分離して見ることは難しい。たとえば、ヒータパワーを一定にしてフィルム有り/無しの破壊電圧を比較すると、電界歪みの効果が陽に出現しそうに思われる。しかし、本実験系ではフィルムの有り/無しで液体の蒸発量は変わらないが、気泡の大きさとギャップ中における分布が変わり、電界歪み以外の効果も破壊電圧に現れる。しかし、電界歪みの効果はH一定下でフィルム有り/無しの破壊電圧の比較より、また、熱気泡の挙動の変化による効果は与えられた電極でヒータパワーを変えたときの破壊電圧の比較により、ある程度推定できると考えられる。この観点から図13を調べると、放電痕がある場合の電界歪み効果が気泡効果に比べて同程度かそれ以上であると言える。特に、 $g=2\text{mm}$ 、 $H=0$ においてフィルム有り/無しで大きな差が出ているが、これは放電痕における電界歪み効果の寄与が大きいためと考えられる。しかしこの場合も、前の放電による放電痕にトラップされた気泡の寄与もゼロではないであろう。

何れにしても、超伝導コイルのクエンチ環境下で固体絶縁物が一度破壊を経験すると、破壊前の系の耐電圧が高いほど絶縁劣化の程度が大きくなる。

5. むすび

本論文では、液体窒素中での熱気泡を介した絶縁破壊に対する絶縁フィルムの影響について、検討を行った。その結果を要約すると次のようになる。

(1) 気泡挙動に対するフィルムの影響は、フィルムによる気泡発生に対する影響とフィルム端及び放電によって形成された小孔における気泡のひっかかりによる成長促進を通して主に出現する。

(2) フィルムが存在する場合でも、孤立気泡に作用するグラディエント力によって気泡集塊または橋絡が発生するが、破壊電圧低下の原因は最短ギャップ付近に存在する変形気泡か、放電痕から成長する橋絡気泡で、グラディエント力の作用によって成長した大きな気泡が破壊電圧低下の原因になることは少ない。

(3) 破壊電圧は、フィルム上に放電痕が形成されることによって著しく低下し、その最低値は77Kの窒素ガス中の値に近い。

(4) フィルム上の放電痕の形成は、液体の破壊電圧がフィルムの耐電圧より大きくなるギャップにおいて高い確率で出現する。

(5) 超伝導コイルのクエンチ環境下で固体絶縁物が一度破壊を経験すると、破壊前の系の耐電圧が高いほど絶縁劣化の程度が大きくなる。

本研究の一部は、文部省科学研究補助金基盤研究によった。

(平成9年2月10日受付、平成9年5月26日再受付)

文 献

- (1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 超電導電力応用技術開発トータルシステム等の研究導入効果の調査研究、平成7年度 委託業務成果報告書 (1996)
- (2) K.Funaki, M.Iwakuma, M.Takeo, K.Yamafuji, J.Suehiro, M.Hara, M.Konno, Y.Kasagawa, K.Okubo, Y.Yasukawa, S.Nose, M.Ueyama and K.Hayashi: "Design and Construction of a 500kVA-Class Oxide Super Conducting Power Transformer Cooled by Liquid Nitrogen", Proc. of 16th ICEC, Kitakyushu, Japan (to be published)
- (3) M.Hara, T.Kaneko and K.Honda: "Electrical Breakdown mechanism of liquid nitrogen in the presence of thermally induced bubbles", Cryogenics, Vol.27, pp.93-101 (1987)
- (4) M.Hara, T.Kaneko and K.Honda: "Thermal-Bubble Initiated Breakdown Characteristics of Liquid Helium and Nitrogen at Atmospheric Pressure", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.23, No.4, pp.769-778 (1988)
- (5) M.Hara and M.Kubuki: "Effect of thermally induced bubbles on the electrical breakdown characteristics of liquid nitrogen", IEE Proceedings, Vol.137, Pt,A, No.4, pp.209-216 (1990)
- (6) M.Hara, Z.-C.Wang and H.Saito: "Thermal-Bubble Behavior Affecting Dielectric Characteristics in Liquid Nitrogen under Non-uniform Fields", Proc. of 8th ISH, Yokohama, Japan, No.93.01 (1993)
- (7) 原雅則、才田健二、齋藤弘勝: 「不平等電界下における極低温液体中の熱気泡挙動の解析」電気学会論文誌A, Vol.113-A, No.4, pp.337-344 (1993)
- (8) 原雅則、王振朝、齋藤弘勝、村松悟: 「液体窒素中における不平等電界下の熱気泡挙動」電気学会論文誌A, Vol.113-A, No.12, pp.817-826(1993)
- (9) 王振朝、吉塚博康、原雅則: 「極低温液体中における直流電界下の気泡運動の解析」電気学会論文誌A, Vol.115-A, No.3, pp.265-272(1995)
- (10) N.Hayakawa, M.Hirose, H. Goshima, M.Hikita, K.Uchida and H.Okubo: "Quench-induced breakdown characteristics of liquid helium and optical observation of thermal bubbles", Cryogenics, Vol.35, No.2, pp.135-142
- (11) 松浦俊輔、高野浩二、江岩、末廣純也、原雅則: 「液体窒素中の気泡挙動に対する電界分布の影響-理論による検討-」電気学会放電研究会資料 No.ED-96-231(1996)
- (12) M.Hara, J.Suehiro and H.Matsumoto: "Breakdown Characteristics of Cryogenic Gaseous Nitrogen and Estimation of its Electrical Insulation Properties", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.24, No.4, pp.609-617 (1989)
- (13) C.G.Garton, and Z.Krasucki: "Bubbles in Insulating Liquids: Stability in Electric Field", Proc. Roy.Soc, A280, pp.211-226(1964)
- (14) R.F.Gaertner: "Photographic Study of Nucleate Pool Boiling on a Horizontal Surface", Journal of Heat Transfer, February, pp.17-29 (1965)

高野 浩二 (学生員) 1969年1月13日生。91年3月九州大学電気工学科卒業。93年3月九州大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月九州電力株式会社入社。96年4月九州大学システム情報科学研究科博士課程入学。超伝導機器の電気絶縁に関する研究に従事。

松浦 俊輔 (学生員) 1974年3月31日生。96年3月九州大学工学部電気工学科卒業。同年4月九州大学大学院システム情報科学研究科修士課程入学。超伝導機器の電気絶縁に関する研究に従事。

江 岩 (学生員) 1967年2月2日生。88年7月武漢水利電力大学電気工学科卒業。中国福建電力会社を経て、95年4月九州大学大学院システム情報科学研究科修士課程入学。超伝導機器の電気絶縁に関する研究に従事。

末廣 純也 (正員) 1961年3月9日生。83年3月九州大学工学部電気工学科卒業。85年3月九州大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月新日本製鐵入社、88年4月九州大学工学部助手、92年4月同助教授、現在に至る。主として、極低温放電現象、および静電細胞操作に関する研究に従事。博士(工学)。95年電気学会論文賞受賞。静電気学会、低温工学、日本生物物理学会員。

原 雅則 (正員) 1942年4月13日生。72年3月九州大学大学院工学研究科博士課程修了。九州工業大学講師、助教授、九州大学助教授を経て同教授。現在、九州大学大学院システム情報科学研究科(<http://www.isee.kyushu-u.ac.jp>)所属。電力工学、高電圧パルスパワー工学、超電導工学、バイオ工学に関する研究に従事。工学博士。IEEE Senior、低温工学協会、静電気学会、放電研究グループ会員。