

## 액체질소 중에서 spacer의 부분적 침적에 대한 연면 방전특성

논문  
13-2-14

### Characteristics of Surface Flashover on Partially Immersed of Spacer in Liquid Nitrogen

김영석\*, 이병성\*, 백승명\*, 정종만\*, 정순용\*, 김상현\*

(Y. S. Kim\*, B. S. Lee\*, S. M. Baek\*, J. M. Jung\*, S. Y. Chung\*, S. H. Kim\*)

#### Abstract

Composite insulation system of liquid nitrogen and solid spacer is widely applied in high temperature superconducting power machine. This study has three step procedure. As follow, first step is composition of parallel deposited electrode and vertically deposited electrode along the direction of immersion in liquid nitrogen(LN<sub>2</sub>). Second step is investigation into surface flashover voltage of solid spacer under partially immersed in LN<sub>2</sub>, and last step is comparison the result of this research with that of fully immersed in LN<sub>2</sub> and at cryogenic temperature gaseous nitrogen(GN<sub>2</sub>). This result presented that surface flashover voltage along solid spacer half immersed in LN<sub>2</sub> was almost the same as that of fully immersed spacer when the thickness of spacer(t) was t<10 mm. In the case of t>10 mm, however, spacer flashover voltage was equal to that obtained in GN<sub>2</sub> at cryogenic temperature. And the immersed-direction functions as role of deciding the difference of surface flashover voltage.

**Key Words(중요용어)** : Surface Flashover Voltage, Solid Spacer, Liquid Nitrogen, Gaseous Nitrogen

#### 1. 서 론

고온 초전도체를 이용한 초전도 발전기, Magnet, Cable 등의 초전도 전력 기기가 연구·개발되고 있으며, 이것을 실용화할 경우 냉매로서는 액체질소(비등점, 77 K)의 사용이 유력시되고 있다<sup>1)</sup>. 고온 초전도체의 경우 액체질소 상에서 응용이 가능하지만, 낮은 임계전류밀도 및 기계적 취약성 때문에 응용분야에 어려움을 겪고 있다. 그러므로, 충분히 임계전류밀도를 향상시키지 않는 현상에서는 초전도 전력 기기의 고전압 화에 의한 대응량화가 필요하게 된다<sup>2)</sup>. 이에 따라 전계의 상승과 극저온의 상황에서의 전력 기기의 절연 설계는 액체질소의 기화에 의한 저온 고밀도 질소가스의 절연특성 및 액체질소 중에서 절연특성의 확립이 중요하다<sup>3)</sup>.

일반적으로 초전도 시스템의 절연방식은 여러 가지가 제시되고 있으며, 그 중에서 얇은 고분자 필름을 적층으로 구성하여 냉매와 함께 절연하는 방식과 고체 spacer와 냉매로 절연하는 액체-고체의 복합 절연방식은 초전도 전력 기기의 전기적 절연방식으로 유력시되고 있다<sup>4), 5)</sup>. 후자인 spacer에 의한 절연방식은 도체의 지지부 및 절연으로 고체 spacer가 사용되며 주위 냉매인 액체 질소로 다시 절연하는 장점을 가지고 있다. 하지만, 전극사이에 spacer를 삽입하므로 절연물의 계면을 따라 진전하는 연면 방전이 문제시되고 있다<sup>6), 7)</sup>. 따라서 초전도 전력 기기 절연설계의 목적에서 냉매부분의 열 침입에 의한 기화현상과 고체 spacer의 부분적인 침적을 가정하여 연면 방전 특성을 조사하였다.

연면 방전 연구는 Toepler의 대기 중 실험을 중심으로 진공, 기체 등에서 연구가 되어 왔으며, 극저온에서의 연구는 아직 미흡한 실정이다. 그리고 연면 방전 형태는 전계가 고체절연물 표면과 평행하여 교차하지 않는 경우와 교차하는 경우의 두 종류로 나뉘며, 고체 절연물의 계면을 따라 초기단계, 성장단계, 최종단계로 방전경로가 형성되어 관통파괴전압보다 낮은 경향

\* : 경상대학교 공과대학 전기공학과  
(진주시 가좌동 900, Fax : 0591-759-2723 E-mail : shkim@nongae.gsnu.ac.kr)  
1999년 9월 15일 접수, 1999년 12월 30일 심사완료

을 나타내어 극저온 절연설계에 주의하여야 한다<sup>8),9)</sup>.

따라서, 본 논문에는 고온 초전도 전력 기기의 절연 방식으로 유력한 고체 spacer-액체의 복합 절연방식을 채택하여 전계가 표면에 교차하지 않는 연면 방전 전극계를 구성하였으며, 이것을 액체질소 속에 부분적으로 침적시켜 연면 방전 특성을 조사하였다. 또한 극저온 기체 질소 및 액체 질소 속에 완전히 침적시켰을 경우와 비교하였으며, 극저온 냉각 시 고체절연물의 응고 및 수축에 의한 미세 crack발생시의 연면 방전특성에 관해 연구하였다.

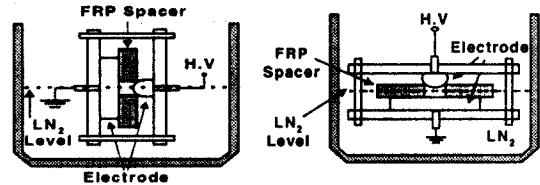
## 2. 실험장치 및 방법

그림 1은 두 전극사이에 spacer를 삽입하여 연면 방전을 측정하는 실험 개략도를 나타낸다. 극저온 기체 및 액체 질소에서의 연면 방전 현상을 조사하기 위해 Pyrex 유리의 내외 조로 된 2중구조의 극저온 저온용기를 사용하였다. 저온용기는 진공( $10^{-3}$ [Torr])을 유지시켜 사용하고 내부에는 은(silver)도금으로 측면에 의한 열 침입을 극소화하였다. 먼저 외부조에 액체질소를 주입하여 내부조의 온도를 안정화시킨 다음, 전극계를 구성한 전극 holder부를 저온용기 속에 넣고 액체 질소를 tube관을 통하여 주입하였다. 또한 플랜지 부분에 부착된 마이크로미터를 이용하여 전극계의 상하를 조절하여 폭 20mm의 관측창을 통해 전극계가 침적되는 액체질소의 수위를 조절하였다. 그리고 이 관측창을 통해 방전현상을 눈으로 확인하여 spacer의 연면에서 방전현상이 일어나는 것만 측정치로 하였다. 또한 극저온 질소 가스의 온도범위에

1. Cryostat	2. Micrometer	3. LN <sub>2</sub> Dewar
4. H.V Source	5. Recorder	6. LN <sub>2</sub>
7. T - Sensor	8. Electrode	9. Spacer

그림 1. 실험장치 개략도  
Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

서의 연면 방전을 측정하기 위해 전극 holder부에 구리-콘스탄탄 열전대를 부착하여 온도기록계(Yokogawa Co)로 온도변화를 측정하였다.



a) Parallel immersion      b) Vertical immersion

그림 2. 연면 방전 전극장치  
Fig. 2. Electrode system for Surface Flashover

그림 2는 본 실험에 사용한 연면 방전 전극계를 나타낸다. 전극재료는 stainless steel(SUS 304) 전극을 사용하였으며, 구(직경 15 mm) - 평판전극(직경 60 mm, 두께 10 mm)으로 구성하였다. 고체 spacer로는 극저온 FRP를 사용하였으며, 내경의 변화를 주었다. 또한 전극과 고체 spacer와의 밀착성을 위해 Teflon을 이용하여 전극의 양쪽부분에 전극 지지부를 구성하고 고체 spacer와 전극부분의 미세 gap를 없애기 위해 용수철을 부착하여 각 전극이 spacer에 밀착되게 고정하였다. 그리고 전극계가 액체 질소 속에 침적되는 방향에 따른 연면 방전전압을 조사하기 위해 수직과 수평의 두 가지 전극배치로 나누어 실험하였다.

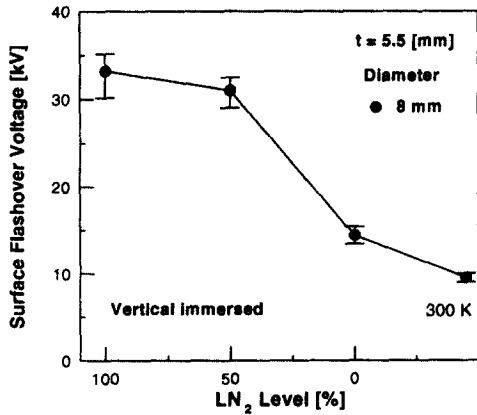
고전압 원으로는 최대 교류전압 90 kV, 주파수 60 Hz인 고전압 장치를 사용하여 전압인가는 전압상승속도 1 kV/s로 서서히 상승시켜 절연파괴 시켰으며, 동일 조건하에서 5~10회 반복측정을 하였다. 그리고 공간전하의 영향을 고려하여 방전 직후 1분이 경과한 후 재차 전압을 인가하였으며, 연면 방전전압의 기록은 고전압 발생장치와 연결된 Recorder를 통하여 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

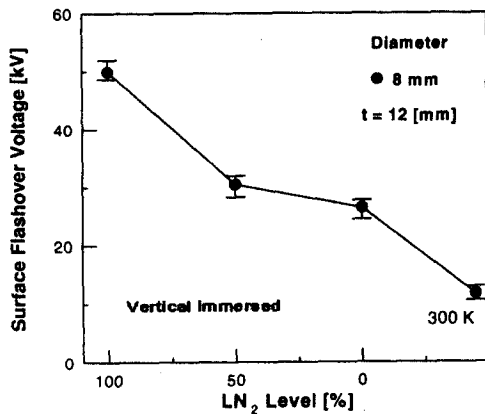
그림 3의 a)와 b)는 전극이 액체질소 속에 수직방향으로 침적되는 경우의 FRP spacer 두께(이하 t로 표기) 5.5 mm, 12 mm, 내경(이하 ϕ로 표기) 8 mm의 액체 질소수위에 따른 연면 방전 전압을 나타내고 있다.

그림에서 액체질소 수위의 100 %는 전극계가 액체 질소에 완전히 침적된 상태를, 50 %일 때는 Spacer에 1/2 침적된 상태를, 0 %는 거의 침적되지 않는 극저온 가스상태를 표시하며 300 K는 실온에서의 연

면 방전전압을 나타낸다. 또한 error bar의 상·하는 측정치의 최대 및 최소값을 나타내며, 표시한 점(●)은 연면 방전전압의 평균치를 나타낸다. 두 그림에서 알 수 있듯이 3-a)의  $t = 5.5 \text{ mm}$ 인 경우, 50% 일 때의 연면 방전전압은 100%의 완전히 침적된 경우에 비해 약간 낮게 나타나지만 거의 같은 전압값을 나타내고 있다. 그리고 0% 일 때는 전압이 급격하게 떨어졌으며, 실온에서의 전압값 보다 높게 나타났다. 하지만, 그림 3-b)의  $t = 12 \text{ mm}$ 인 경우에는 50% 일 때의 연면 방전전압은 급격하게 감소하여 100% 일 때의 전압 값보다 1/2정도로 낮게 나타났으며, 극저온 질소가스(90K)의 전압과 거의 같게 나타났다.



a)  $t = 5.5 \text{ mm}$ ,  $\phi = 8 \text{ mm}$



b)  $t = 12 \text{ mm}$ ,  $\phi = 8 \text{ mm}$

그림 3. 연면 방전 전압의 액체질소 수위 효과  
Fig. 3. Effect of liquid nitrogen level on surface flashover voltage.

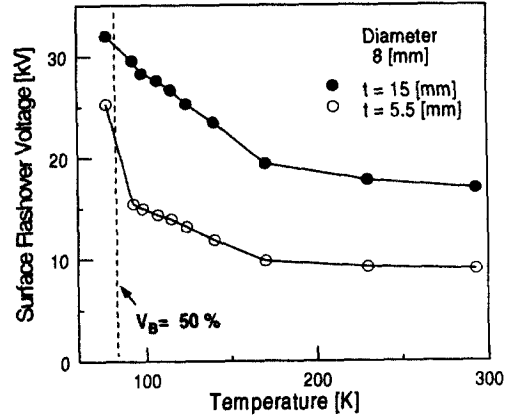


그림 4. 온도변화에 따른 연면 방전전압.  
Fig. 4. Surface flashover voltage vs. variable temperature.

또한 온도변화에 따른 연면 방전전압을 그림 4에 나타낸다. spacer의 내경은 8 mm로 일정하게 두고 두께를 5.5, 15 mm로 변화시켜 실험하였다. 그림에서 점선의 좌측부분은 50% 일 때의 연면 방전전압을 나타내며, 그 외 부분은 액체질소 수위의 0%에 해당되는 극저온 질소 가스 범위에서 측정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 두 가지 경우 모두 온도가 높아짐에 따라 연면 방전 전압은 감소하는 경향을 나타내고 있다. spacer의 두께가 15 mm의 것은 액체 질소 속에 50%로 침적된 연면 방전 전압 값에서 서서히 감소하여 포화되는 값을 가지지만,  $t = 5.5 \text{ mm}$ 의 것은 77 K이상의 온도 범위를 넘어서면 전압은 급격하게 감소한 후 포화되어 경향이 다른 것을 알 수 있다. 이때의 연면 방전전압은 그림 3-a) 및 b)의 0%에서 300 K까지에 해당되는 전압 값을 가졌다. 그러므로 spacer의 두께에 따라 연면 방전 전압은 차이를 나타내고 있으며,  $t = 5.5 \text{ mm}$ 이고 액체질소 속에 50% 침적된 상태에서는 전계가 점점 높아짐에 따라 액체가 상부전극으로 올라가는 climb 현상이 발생하여 100% 일 때의 연면 방전전압과 같이 높게 나타났다. 하지만, spacer 두께가 10 mm이상이고 액체질소 속에 spacer가 50% 침적된 상태는 전계의 증가에 의한 climb 현상은 더 이상 일어나지 않고 절연내력이 약한 질소 가스층에서 먼저 방전이 발생했다.

그림 5는 spacer 두께변화에 따른 연면 방전전압을 나타낸다. 액체 질소의 레벨에 관계없이 연면 방전 전압은 spacer가 두께위 질수록 증가하는 경향을 나타내고 있다. 하지만, 액체 질소의 50%인 경우

spacer의 두께에 따라 전압의 증가폭은 적었다.

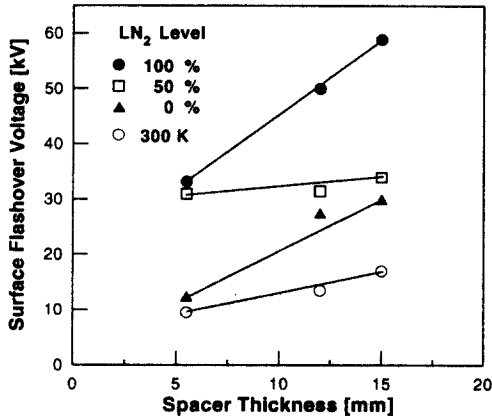


그림 5. Spacer의 두께 변화에 따른 연면 방전전압.  
Fig. 5. Surface flashover voltage under different spacer thickness.

그림 6은 spacer의 두께 12 mm인 것에 내경 변화에 따른 연면 방전전압을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 연면 방전전압은 내경이 증가함에 따라 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 spacer의 내경이 증가함에 따라 전극의 약점부가 증가하여 연면 방전 전압이 감소하는 결과라 생각된다.

그림 7은 전극 거칠기에 대한 연면 방전 전압을 나타낸다. 거친 표면처리를 행한 전극표면의 돌출부는 4.5 μm

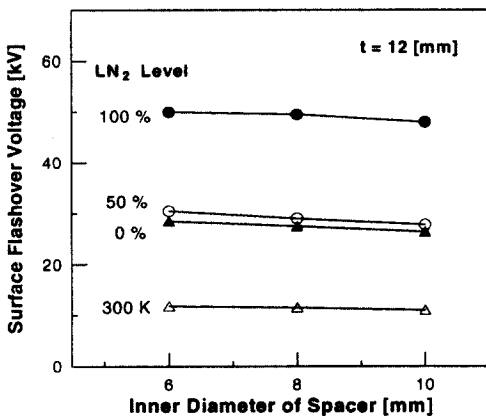


그림 6. Spacer의 내경 변화에 따른 연면 방전전압.  
Fig. 6. Surface flashover voltage under different spacer diameter.

로 하고, 연마제인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 이용하여 표면 연마한 경우의 돌출부는 0.5 μm 정도이다. 여기서 돌출부의 측정은 표면 조도계(Suftest 402, Mitutoyo Co.)를 사용하였다.

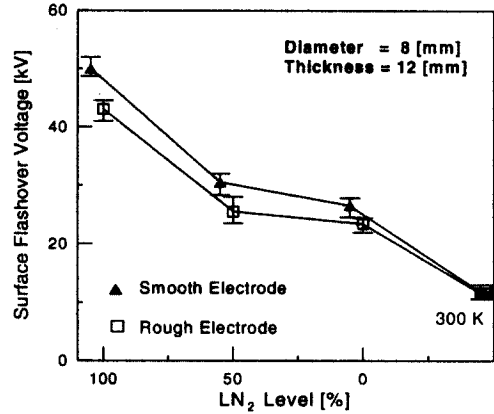


그림 7. 연면 방전전압의 전극표면 효과  
Fig. 7. Effect of electrode surface on surface flashover voltage.

전극 표면에 거친 처리를 행한 전극의 연면 방전 전압이 표면 연마한 경우의 전극과 비교해서 약간의 전압의 감소가 나타났다. 이것은 거친 전극의 경우 전극 표면의 약점부분이 증가하게 되고, 날카로운 돌출부에서 전계가 집중되어 국부방전이 일어난다고 생각된다.

그림 8은 액체질소 속에 침적되는 수평방향과 수직 방향에 대한 50 % 연면 방전전압을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 액체질소 속에 침적되는 방향이 수직인 경우, 연면 방전전압은 거의 변화가 없이 일정한 전압 값을 나타내고 있다. 하지만 침적되는 방향이 수평인 경우의 연면 방전전압은 spacer 내경이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 수직배치인 경우, spacer 내경이 증가해도 기체와 액체의 복합 층이 그대로 형성되어 전압의 변화는 일어나지 않았다. 하지만, 수평배치인 경우 spacer 내경이 증가함에 따라 기체 층의 영역이 증가하여 절연내력이 좋은 액체 상에는 방전이 일어나지 않고 상대적으로 절연내력이 약한 질소가스상의 방전이 발생하였다.

고온 초전도 전력 기기의 절연설계에서 주위의 극저온 냉매는 고체 절연물의 수축 및 응고현상을 일으키며, 절연물의 미소 crack을 발생시켜 연면 방전을 일으키게 되므로 전기절연이 문제시되고 있다. 이에 그림 9와 같이 spacer에 인위적으로 crack 각을 만

들어 실험하였으며, 그림 10에 극저온 질소가스 (90K)상에서 spacer에 crack이 발생했을 때의 crack 각도에 대한 연면 방전전압을 나타낸다.

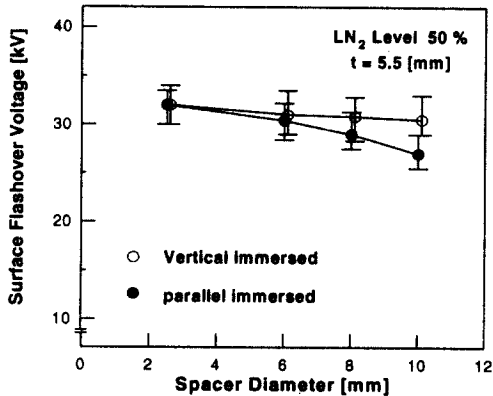


그림 8. 액체 질소속에 침적되는 방향에 따른 연면 방전전압.  
Fig. 8. Surface flashover voltage on immersion direction in liquid nitrogen.

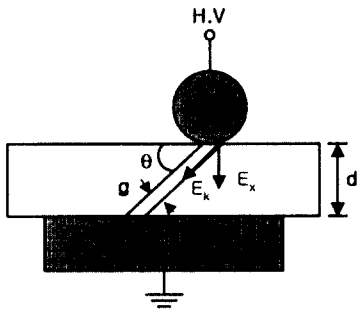


그림 9. Crack 각도에 대한 연면 방전 전극계.  
Fig. 9. Surface flashover electrode on crack angle.

여기서 crack 중의 gap에 걸리는 전압은 다음 식에 주어진다<sup>10)</sup>.

$$V_B = \frac{2 E_k}{\epsilon} \left\{ \frac{g(\epsilon - \epsilon')}{\sin 2\theta} + \frac{d \cdot \epsilon'}{2 \sin 2\theta} \right\}$$

(여기서,  $E_k$  : 연직파괴 강도,  $g$  : gap 길이,  $\epsilon$  : 기체 질소의 유전율,  $\epsilon'$  : spacer의 유전율,  $d$  : spacer의 두께,  $\theta$  : crack 각도)

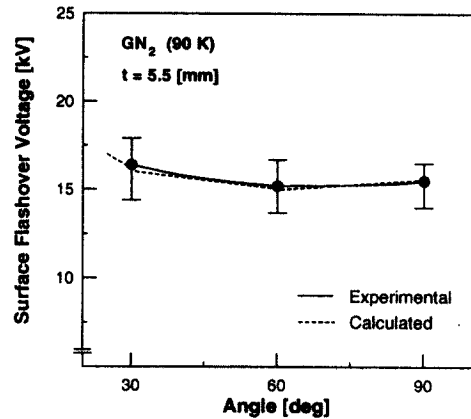


그림 10. Crack 각도에 의한 연면 방전 전압.  
Fig. 10. Surface flashover voltage on crack angle.

그림에서 알 수 있듯이 각도에 의존해서 약간의 U자형의 곡선을 나타내며, 두께가 두껍게 되어 각도가 작은 영역에서는 고체의 관통파괴는 일어나지 않고 파괴전압의 상승도 일어나지 않았다. 또한 이 실험 결과와 수치적인 결과가 동일함을 알 수 있다. 하지만, crack 각에 대한 연구가 더 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 얻어진 결과들은 다음과 같다.

1. 액체질소 속에 고체 Spacer가 50 % 침적되었을 때의 연면 방전전압은 spacer의 두께에 의존하였고,  $t < 10 \text{ mm}$ 이하에서는 100 % 침적되었을 때와 거의 같았다. 하지만,  $t > 10 \text{ mm}$  이상에서는 극저온 질소가스의 연면 방전전압과 거의 같았다.
2. 액체질소 속에 전극계가 침적되는 방향에 따라 방전전압의 차이가 나타났으며, 수평으로 침적되는 방향의 연면 방전전압이 수직으로 침적되는 것보다 낮게 나타났다.
3. 고체 spacer의 두께가 증가함에 따라 액체 질소의 수위에 관계없이 연면 방전전압은 상승하였으며, spacer 내경의 증가에 따라 연면 방전전압은 약점부분의 노출로 인해 약간 감소하였다.
4. 극저온 기체에서의 spacer의 crack 각에 의한 연면 방전전압은 계산결과와 잘 일치하였다.

### 감사의 글

본 연구는 한국전기연구소의 연구지원비에 의해 수행되었으며, 효성 중공업연구소에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. K. Funaki, et al, "Preliminary of a 500kVA-Class Oxide Superconducting Transformer cooled by Subcooled Nitrogen", IEEE Trans. on Appl. Supercond. 7, 2, pp. 824-827, 1997.
2. 吉田 義勝, Michal Rabara, 宮 健三, "Bi-2223高温超電導テープ材臨界電流密度の磁場方向依存性", 低温工學, Vol. 33, No. 6, pp. 363-370, 1998.
3. 原 雅則, "超電導應用器機に求められる高耐電壓化", 電氣學會誌, 116卷 6號, 1996.
4. 김상현, "초전도 케이블 및 송전 시스템 개발-전기절연기술-", 최종보고서, 한국전력공사 1996.
5. A. Bulinski and J. Densley, "The Impulse Characteristics of Electrical Insulation Operating at Cryogenic Temperatures", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 15, pp. 89-96, 1980.
6. 星野, 力石, 柳, 山本, 本島, 小崎, 原 "スペーサをつ平板電極系における低温ガスの沿面放電特性", 電氣學會研究會資料, ED-96-84, DEI-96-49, 1996.
7. Qiaogen Zhang et al, "Effect of surface Charge on Impulse Flashover Voltages of Spacer in SF6", Proceeding of 1998 International Symposium, pp. 27-30, 1998.
8. 岩田善輔, "液體窒素中の沿面放電", 電氣學會絶縁材料研究會資料, No. IM-72-40, 1972.
9. J. Gerhold, "Dielectric breakdown of cryogenic gaseous and liquids", Cryogenic, 19, pp. 571-584, 1979.
10. 室岡他, 放電絶縁材料合同研究會資料 ED-76-12, EIM-76-19, J. Appl. Phys. Vol. 48, 1977.