

極 低 溫 送 電

朴 鍾 根*

□ 차 례 □

- | | |
|--------------------|--------------------|
| 1. 序 論 | 3.1 材 料 |
| 2. 海外에 있어서의 技術開發動向 | 3.2 構 造 |
| 2.1 概 說 | 3.3 極低溫에 있어서의 電氣絶緣 |
| 2.2 CRC의 開發現況 | 4. 結 論 |
| 2.3 SC의 開發現況 | 參 考 文 獻 |
| 3. 極低溫케이블의 基本概念 | |

1 序 論

電氣에너지가 2次에너지에 점하는 比重은 점점 높아 지는 반면에 電源地點은 消費地로부터 遠隔化되는 傾向에 있기 때문에, 巨大한 電氣에너지를 運送하는데 있어서 送電루트의 確保는 큰 問題로 登場할 것이다. 따라서 從來의 架空送電方式은 次期豫想 送電電壓인 UHV의 實現으로서 그 限界에 達할 것이 豫想되고, 그 後에는 大電流, 高電界를 利用한 高密度化의 方向을 攄하지 않을 수 없을 것이다.

그러한 目的을 達成하기 위하여는 新送電方式의 實現이 要求되는데, 極低溫送電이 有力한 方式으로 손 꼽히고 있다.

가까운 將來의 送電容量 니드(Need)에 대해서는 구태어 極低溫領域에 들어가지 않더라도 從來의 方法, 即 물, 기름, 후룬 등으로 直接 銅이나 알루미늄을 冷却시키는 方法으로도 對處할 수 있지 않으나 하는 意見도 있다. 그러나 먼 將來를 생각하면 더욱 콤팩트하고 大容量의 電力傳送의 可能性을 秘藏하고 있는 極低溫抵抗케이블送電, 일보 나아가서는 超電導送電을 無視할 수가 없다.

여기에서는 極低溫送電方式 即 極低溫抵抗케이블

(以下 Cryogenic Resistance Cable라 함)과 超電導케이블(以下 Superconducting Cable라 함)의 基本概念 및 海外에 있어서의 技術開發動向을 簡單히 紹介하기로 한다.

2 海外에 있어서의 技術開發動向

2.1 概 說

알루미늄, 銅의 抵抗이 極低溫에서는 그림 1과 같이 거의 溫度의 5乘에 比例하여 低下한다. 그러나 極低溫을 維持하기 위하여 使用되는 冷凍棧의 效率를 考慮하지 않으면 시스템으로서의 損失低減評價는 正當하지 못한 것이 된다. 그림에서 보는 바와 같이 運轉溫度에서 發生하는 損失(Q)과 이 損失을 除去하는데 必要한 動力(W)과의 比는 溫度가 低下함에 따라 크게 增加하는 것을 알 수 있다. 따라서 極低溫케이블의 定格을 定할 때는 冷却設備部品과 冷却用 電力消費量이 重要한 要因이 된다. 巨視的인 指標로서, 送電電力이 주어졌을 때 發生損失(導體損失, 시스(sheath)損失, 誘電體損失, 熱流入損失 및 流動摩擦損失等)을 最小로 하는 條件 即 冷却設備費 및 冷却用 電力費를 最小로 하는 條件에 있어서의 電壓, 電流가 케이블의 定格이 된다.

上述한 基本概念으로 送電電力과 送電電壓, 電流

*正會員：서울大 工大 電氣工學科 助教授·工博

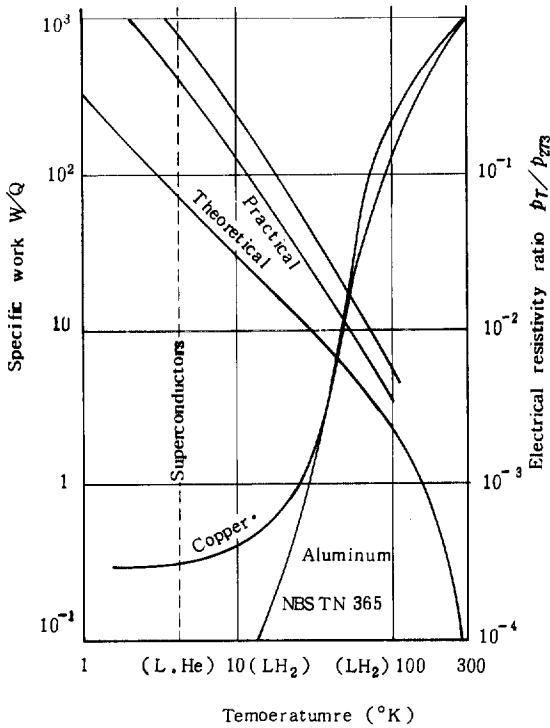


그림 1. Specific work and electrical resistivity ratio

및 送電損失의 關係의 한 例를 그림 2에 보인다. 그림에서 알 수 있듯이 SC는 比較的 大電流形이고, CRC는 比較的 高電壓形이다. 또한 같은 CRC라도 液體窒素 冷却케이블이 液體水素 冷却케이블보다 高電壓形케이블임을 알 수 있다. 그러나 送電電力이 5~10 GVA의 範圍에서는 液體水素 冷却 CRC라도 UHV 領域으로 된다. 絶緣技術上的 問題를 생각할 경우 5~10GVA帶에서는 EHV 領域을 最適으로 하는 SC쪽이 實用的으로 使用하기 쉽다. 한편 1~5 GVA帶에서는 SC가 絶緣問題는 적다고 할 지라도 케이블 流入熱量을 冷却하기 위한 冷却機電力이 相對的으로 커지기 때문에 오히려 이 範圍의 送電電力帶에서는 EHV CRC가 適合하다고 볼 수 있다.

또한 將來의 LNG 冷熱利用을 並用할 경우는 有利해 질 수 있다고 본다.

最近 10數年에 걸쳐서 超電導케이블 送電에 대하여 世界各國에서 feasibility study가 행하여졌는데, 그 信賴性 및 經濟性을 포함한 實用性 評價는 多樣하다. 대체로 歐州쪽에서는 가까운 將來의 實用性에 대해서는 疑問을 갖는 곳이 많고, 美國, 소련, 日本에서는 國立研究所가 主가 되어 實用化를 向한 開發研究가 活發하게 進行되고 있다.

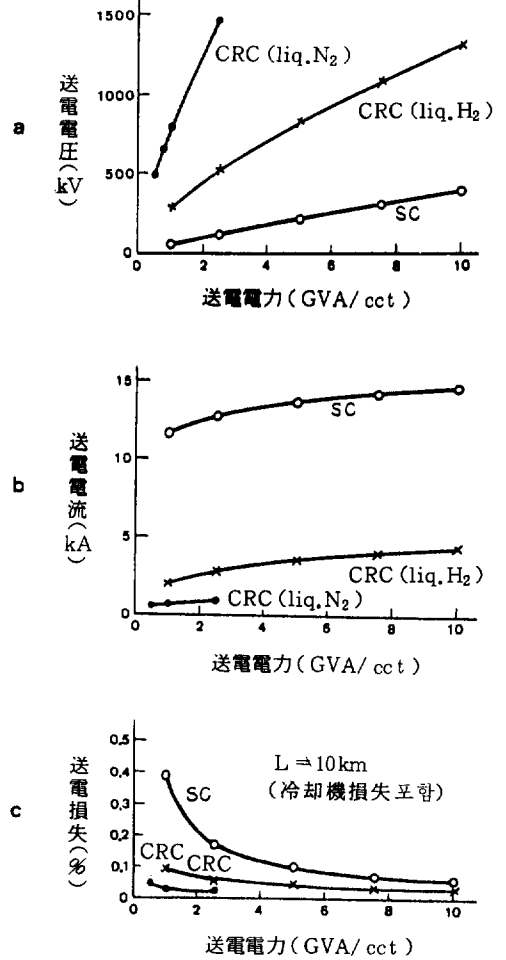


그림 2.

2.2 CRC의 開發現況

CRC의 開發은 프랑스 (CGE)와 美國 (GE)에서 일찍부터 시작됐다. 특히 소련은 리질타입 (Rigid type)보다 經濟的인 후렉씨블타입 (Flexible type) CRC의 開發을 推進하고 있는데 1985년까지 發電所와 變電所間에 240m를 實際로 建設할 豫定이라 한다. 소련에서 CRC는 0.8 GVA以上에서 比較的 短距離의 경우에 他地中線路에 比해서 經濟的 메리트 (merit)이 있다고 推定하고 있다. 各國의 開發現況은 표 1과 같다.

2.3 SC의 開發現況

SC의 開發은 英國 (BICC), 美國 (UCC), 日本 (古河電工) 등에서 1960年代에 리질타입 (Rigid

표 1. Development of CRC

회 사 명	古 河 電 工 (일 본)	藤 倉 電 線 (일 본)	大 日 本 電 線 (일 본)	G E (미 국)	C G E (프 랑 스)	소 련
전 압	500 KV 154 KV AC	154 KV AC	22 KV AC	500 KV AC	목표 ± 125 KV DC	110 KV AC
통전전류	5000 A (목표 12000 A)	목표 2400 A	15000 A	0 A	3500 A (목표 8000 A)	3000 A
송전용량	목표 12000 MVA	목표 640 MVA	570 MVA	목표 3500 MVA	목표 2000 MVA	570 MVA
상 수	3 상	단상		단상	직류	3 상
항 장	20 m	15 m	15 m	40 feet	20 m	9 m, 34 m
도 체	Al	Al	Cu	Al	Al	Cu, Al
시 험 결 과	1. tyvek의 절연 특성 교류내압 230KV 1시간 ok. Impulse 920KV에서 단말과과 190KV에서 $\tan \theta$ 는 1×10^{-6} 이하 2. 3상 1주간 연속 통전 운전 성공	1. AC 410KV에서 섭락. 2. Impulse 1100KV에서 섭락. 3. $\tan 0.1\%$	1. 12 KA 통전	1. $\tan \theta < 5 \times 10^{-6}$ 2. 파괴 최대 Stress AC 640V/mil 3. 유전율 1.8	1. 3mm 두께에서 40KV 내압 시험 ok. 2. 최대 전류 밀도 10A/mm ² 3. 2A/mm ² 에 3500A까지 통전하였고 장래 4A/mm ² 을 목표로 함.	1. 1000 A, 2000A, 3000A 통전 ok. 2. 최대 전류 밀도 10A/mm ² 3. AC 내압 160KV-24시간 후, 260KV - 60초 후 ok.

표 2. Development of SC

회 사 명	SIMENS (서독)	BICC (영국)	CGE (프랑스)	BNL (미국)	UCC (미국)	古 河 (일본)
송전 방식	AC	AC	AC DC	AC	AC	AC DC
목표 전압 (KV)	110	35	125 ± 100	138	138/230/345	154 ± 75
목표 전류 (KA)	10	13	14 20	4	7.1/11.8/17.75	3 33
송전 용량 (MW)	2000	750	3000 4000	1000	1690/4710/10590	1000 5000
초전 도체 + 안정 화재	Nb 와이어 Al, Cu	Nb 튜브 Al	Nb 조 Nb-Ti 조 Al Al	Nb Sn 조 Al	Nb 튜브 Cu	Nb Nb-Ti Cu Cu
실 험 상 황	35일의 모델 제작 완료 110KV, 10KA 단상 송전 1973년	3m의 단상 케이블 2080 A 통 전	18m의 용 기 제 작 1975년 완	삼상 100m의 테스트 장치 3850A의 통 전 교류 손실 측정 계속 중	7m의 실험 장치 교류 손실 측정 1975년 완	7m의 케이블 통전 테스트

type)의 모델케이블로 始作되었다. 그 後에 各國에서 세미후렉씨블(Semi Flexible), 후렉씨블(Flexible) 타입의 開發이 이루어졌다. 長尺 케이블의 實驗 実績으로는 Siemens가 1978년에 35m의 세미후렉씨블 케이블 모델로 課通電實驗(110 KV, 10 KA)을 했다. 그 후 오스트리아에서는 1979年 10月 60 KV 送電線의 一部 50m의 區間 1相分에 接續된 超電導케이블로 150A, 100時間에 送電에 成功했다. 또한 美國의 부록크하벤 研究所에서는 1972年부터 年豫算 300萬~400萬달러로서 超電導 케이블의 研究을 推進하고 있다. 各國의 開發現況은 표 2와 같다. 표 2를 보면 世界 各國은 超電導交流送電의 研究에 注力을 두고 있다. 超電導直流케이블은 交流損失이 없어서 大電流를 흘릴 수 있는 長點이 있는 반면에 交流系統과의 連結를 위한 인버터, 遮斷器 等の 端末棧器에 制限이 있다. 現在 電力系統에서 緊急히 超電導送電이 要求되는 것은 都心地의 短距離送電이기 때문에, 端末棧器의 影響이 거의 없어질 程度의 長距離送電에 適合한 超電導直流送電보다는 超電導交流送電이 先行 檢討되어야 한다고 생각된다.

③ 極低温케이블의 基本概念

3.1 材料

CRC 케이블의 경우에는, 그림 1에서 알수 있듯이 實際運轉豫想溫度 80°K 附近에서 보면 銅, 알루미늄은 比抵抗이 거의 같기 때문에 當然히 알루미늄을 採用한다. 따라서 여기에서는 超電導케이블材料에 限定하여 簡單히 叙述한다.

Nb - Ti, Nb - Zr, Nb₃Sn, Nb₃Ge과 같은 超電導材料은 液體헬륨 溫度에도 充分히 큰 溫度餘裕를 가지고 있고 高磁界에도 견딜 수 있는 特徵을 가지고 있다. 그러나 이와 같은 超電導材料은 交流磁界中에서 큰 交流히스테리시스 損을 이르게 된다. Nb - Ti와 Nb₃Ge의 경우 前者가 運轉溫度 4.5~5.5°K, 後者가 15~16°K로 設計値를 잡은 例가 있다. Nb₃Ge은 臨界溫度가 23.2°K로서 液體水素의 沸點보다 높아서 헬륨을 쓰지 않는 超電導케이블의 實現可能性을 提示해 주고 있으나, 그 高性能特性이 熱的準安定狀態에 限定되기 때문에 現在技術水準으로는 線材의 넓은 面積全體에 均一한 準安定狀態를 얻기는 困難하다.

交流超電導體로 쓰여지고 있는 各材料은 그 長點 및 短點이 있다. Nb는 交流損失은 적으나 臨界溫度

및 臨界磁界가 낮다는 短點이 있어서 短絡事故나 溫度變化가 있을 경우에 信賴性의 問題가 있고, Nb - Ti는 臨界磁界는 높으나 臨界溫度가 比較的 낮다. Nb₃Sn, Nb₃Ge는 諸特性이 좋으나 製作이 어렵다는 難點이 있다.

3.2 構造

케이블構造에는 리질(Rigid)型, 후렉씨블(Flexible)型, 세미후렉씨블(Semi Flexible)型 3種類가 있다. 리질型은 構造가 簡單하여 工場生産이 比較的 容易하나, 熱收縮對策, 導體接續技術等의 問題가 있어 世界的으로 有望視되고 있지 않다. 후렉씨블型은 工場에서 冷却管까지 包含시켜 製作하여 드럼에 감아서 現場에까지 運送되기 때문에 敷設場所에서의 作業이 줄어 든다. 그러나 드럼 自體의 크기가 制限되어 케이블의 絕緣두께에 制約이 생긴다. 리질型과 후렉씨블型의 折衷案으로 세미후렉씨블型이 있는데, 이것은 케이블코어는 후렉씨빌리티(Flexibility)를 갖게 하고 冷凍管은 리질으로 한 것이다.

極低温抵抗케이블에는 三心세미후렉씨블型과 單心 후렉씨블型이 있는데, 이 構造는 從來의 管路氣中送電의 構造와 같다. 即 金屬파이프(Sheath)속에서 導體를 絕緣支持物(스페이서)로 三心狀 또는 單心狀으로 支持하고, 導體와 시스間에 液體窒素를 流入하는 構造이다. 最近의 計算機시뮬레이션에 의하여 單心 후렉씨블型이 三心세미후렉씨블型보다 損失面이나 經濟的인面에서 有利하다는 것이 밝혀졌다.

現在 가장 有望視되고 있는 絕緣方式인 헬륨습浸테이프絕緣의 경우라도 最大電界強度는 10KV/mm 程度까지 抑制할 必要가 있어서 電壓을 높게 設定할 必要가 있는 交流케이블은 세미후렉씨블型의 採用이 豫測된다.

三相用 交流超電導케이블로서 數種의 構造가 提案되어 있으나 가장 一般的인 例는 그림 3과 같다. 코

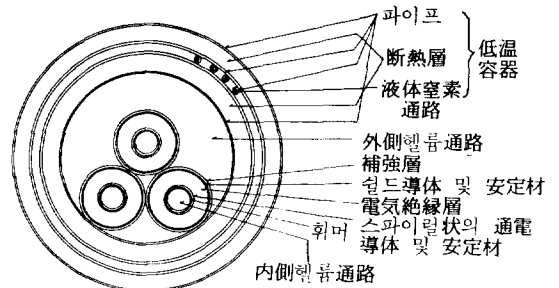


그림 3. An example of SC.

어의 가장 内部에는 可撓性的 휘머 (Former)가 位置하는데, 이것은 冷媒의 通路로도 되기 때문에 휘머 밖에 있는 通電導體를 效率 좋게 冷却시킬 수 있는 것이어야 한다. 通電導體는 테이프狀의 超電導導體를 스파이럴狀으로 감아서 構成되는데 導體의 安定材는 超電導導體의 안 쪽에 位置한다. 通電導體위에 電氣絶緣層이 놓여 지는데 이것은 冷媒인 超臨界헬륨을 쓰는 方法과 헬륨습透테이프絶緣方法의 2種類가 있다.

電氣絶緣層의 外側に 位置하는 것이 쉴드 (Shield) 導體인데, 이것은 通電電流에 依해서 發生하는 電磁界를 케이블內에 封鎖하여 周圍의 冷却파이프에 渦流損의 發生을 抑制하는 役割을 한다. 쉴드用 超電導導體의 安定材는超電導導體의 外部에 位置한다. 가장 外部에 冷却파이프, 斷熱層, 液體窒素로 構成된 低温容器가 位置한다.

3.3 極低温에 있어서의 電氣絶緣

極低温에서 動作하는 超電導棧器의 信賴性, 安定性을 높이고 最適設計을 위해서는 極低温電氣絶緣技術의 確立이 不可欠하다. 極低温領域에서 使用되는 絶緣體에는 電氣的인 問題外에도 棧械的, 熱的인 問題가 많다. 電氣分野에 局限하여 電氣絶緣性 問題를 들면 다음과 같다.

- (1) 極低温液體의 絶緣破壞
- (2) 極低温에서의 氣體絶緣破壞
- (3) 極低温에서의 固體絶緣破壞
- (4) 極低温液體 및 固體表面의 沿面放電
- (5) 極低温에서의 코로나現象
- (6) 트리잉 (treeing)

CRC에 使用되는 冷媒 低温窒素가스의 絶緣特性은 그림 4와 같다. 低温窒素에서 임펄스 絶緣耐力이 交流波高值보다 높게 되어 있는데 이것은 低温에서는 電極의 電子放出이 적어져서 짧은 波形 일수록 絶緣耐力이 上昇하기 때문이었다. 그림에서 알 수 있는

것은 低温窒素를 使用하면 常温의 同一壓力 SF₆ 가스 와 거의 같은 絶緣耐力을 얻을 수 있다는 것이다.

液體헬륨의 絶緣破壞特性은 그림 5와 같다. 그림에서 正針電極의 破壞電壓이 負針電極보다 높고, 더욱이 同一電極間長의 平等電極의 경우보다도 높은 特異性을 볼 수 있다. 이것은 液體헬륨의 絶緣破壞 主要因이 電極에서 流入되는 電子에 있다는 것으로 說明될 수 있다.

電氣絶緣의 信賴性 評價에 중요한 要因中的 하나는 破壞電壓의 偏差인데, 이 偏差는 陰極表面에 그 發生原因이 있다. 따라서 陰極表面과 電界와의 相互關係는 絶緣設計에 중요한 意味를 가지게 되며 이 相互關係를 明確히 하기 위해서는 針-平板電極의 코로나現象에 관한 研究가 必要하다.

上述한 바와 같이 極低温에서 氣體의 絶緣耐力은 좋고, 또한 5°K, 8 atm의 超臨界헬륨의 絶緣耐力도 50 KV/mm로서 높다고 判明되어 있다. 그러나 実

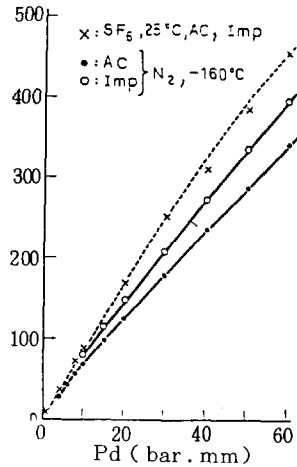


그림 4. Comparison of breakdown voltage between N₂ gas at cryogenic temperature and SF₆ gas

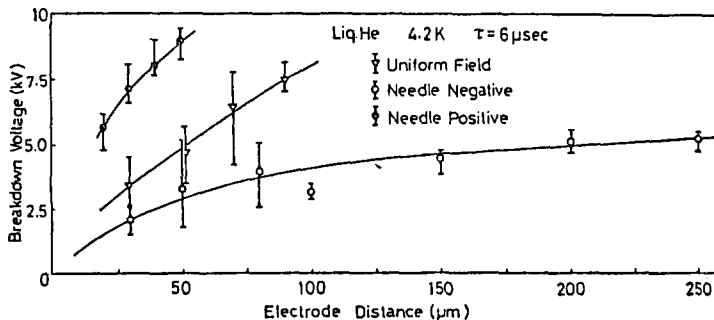


그림 5. Breakdown voltage of liquid He

際로는 固體表面에서의 沿面放電電壓이 常溫域보다 낮아지는 경우가 있다. 따라서 支持스페이서 表面의 沿面放電에 의해서 絶緣耐力이 어느 程度 低下하는 지를 檢討할 必要가 있고, 또한 電界分布와 放電物理의 側面에서 봐서 바람직한 스페이서形狀이 어떤 것인지 檢討할 必要가 있다.

4 結 論

以上으로 極低溫送電의 海外技術動向 및 그 基本 概念에 대하여 叙述했다. 世界各國에 있어서의 極低溫送電은 아직 研究段階를 벗어나지는 못하고 있으나, 省에너지, 送電코스트, 點有空間 等の 面에서 볼때, 아주 魅力的인 送電方式이다.

이런 점을 考慮해 볼때 우리는 海外技術動向을 注視해 가면서, 現在技術로 開發可能한 極低溫低抗케이블을 出發點으로하여 將來의 超電導送電實現을 向한 研究開發에 努力해 나가야 할 것이다.

參 考 文 獻

- 1) G. Kaplan; "Superconducting power cables", IEEE Spectrum p.60, 1980
- 2) K. Matsuura; "Basic Design of Cryogenic power cables", Sumitomo Electric Technical Review, No. 12, p.17, 1969
- 3) E. E. Forsyth, et al.; "Progress in the development of gas-impregnated lapped plastic film insularion", IEEE, Trans. PAS, pas-97, p.734, 1978.
- 4) 堀井・小崎; "ここきできている超伝導送電" 日本電学誌, 101(4), p.329, 1981
- 5) 河野他; "極低溫高密度窒素ガスの交流及び"フラッシュオーバー電圧特性", 日本電学誌論文誌,

- 文誌, 57-B99, p.809, 1982
- 6) 日本文部省科学技術研究費補助金エネルギー特別研究報告書; "電氣エネルギーの有効利用と高密度化に関する報告書", 1980
- 7) 日本大阪大学; "超電導工学実験センター報告書", 1982
- 8) E. B. Forstyh, et al.; "Flexible superconducting power cables", IEEE Trans. PAS-92, p. 434, 1973
- 9) J. F. Bussiere & M. Suenaga; "Reduction of AC loss of Nb₃ Sn by surface treatment", J. Appl. Ph ys. 45, p.4611, 1974
- 10) D. Sebesta; "Planning for future cable system", Elect. World 180, No. 8 p.76, 1978
- 11) E. B. Forsyth, et al.; "The "The technical and economic feasibility of superconducting power transmission; a case study", IEEE Trans, PAS-94, p.161, 1975
- 12) T. W. Dakin, et al.; Breakdown of Gases in Uniform Fields: Pashen Curves for Nitrogen, Air and Sulfur Hexafluoride", Electra, 32, p.61 1974
- 13) E. Finkelmann; "Der electrische Durchshlag verschiedener verschiedener homhe druck", Archiv. fur Electrotechnik XXXI, p.282, 1937
- 14) 野口・河野・鳳; "低溫領域におはる空氣と窒素のフラッシュオーバー特性", 日本電学論入誌 A-92, p.129, 1972
- 15) 河野・殖栗; "低溫におみる窒素ガスのインパルスフラッシュオーバー特性と暗電流", 日本電学学論文誌 A-94, p.469, 1974
- 16) 野口・堀井; "密閉タンク中の平等電界におけるインパルス破壊電圧ほの分希", 日本電学学論文誌 88, p.2142, 1968