

SF<sub>6</sub> 대체가스 연구동향이동희  
수원대학교Trends on the Research for Alternatives of SF<sub>6</sub> GasDong-Hee Rhie  
The University of Suwon

**Abstract** - Environmental impact of human activities has become a great concern in most of the countries world-wide, and for years. It has recently focused on potential climate changes due to the increase of green house gases content in the atmosphere. One of these gases is SF<sub>6</sub>, which is an essential material in electrical applications having excellent dielectric and arc-quenching properties. Though the actual contribution of SF<sub>6</sub> to global warming is negligible at present, the control of SF<sub>6</sub> emissions seems to be nevertheless imperative. Actually, it is listed in the Kyoto protocol that emissions should not only be duly reported but also the electrical industry which is now the major user of this gas must be able to show that it is possible to use this gas and at the same time preserve the environment. For the development of environmentally-benign electric power equipment and systems, novel gases or gas mixtures are strongly required as the alternatives of SF<sub>6</sub> gas. Until now, most research work is focused on the SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> mixed gas which is suitable for application in the electrical apparatus with slightly non-uniform fields. Recently, SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> mixed gas also is expected to be promising as a SF<sub>6</sub> alternative, especially in highly non-uniform fields and in a gas-impregnated film insulation system. Including these results, the author reviews the research trend on reducing the environmental impact of SF<sub>6</sub> gas in this paper.

## 1. 서 론

SF<sub>6</sub> 가스는 상용분야에서 연구분야에 이르기까지 그 응용분야가 극히 광범위하여 현재까지 가장 활발히 연구되어 온 분자기체 중의 한 종류이다. 이 가스의 물리·화학적 성질과 다양한 기체방전특성 그리고 전력산업분야에서의 사용기술은 광범하게 연구되어 왔다[1,2]. SF<sub>6</sub> 가스는 정상상태에서 화학적 불활성, 무독성, 난연성, 비폭발성, 그리고 열적안정성(500℃ 이하에서 기상으로 분해되지 않음)을 가진다. 이 가스의 상대적 불활성 및 무독성에 의해 여타 생물자원(biomass)에 대해 유해한 효과를 미치지 않는다는 점에서 일반적으로는 환경적으로 안전하고 수용가능한 물질로 간주되어 왔다.

SF<sub>6</sub> 가스는 송전 및 배전 설비에 적합한 여러 가지 성질을 가지고 있다. 이 가스는 실온 및 실온보다 상당히 높은 온도에서도 큰 전기부성효과를 나타내며, 이 전기부성효과에 의해 높은 절연내력과 우수한 아크차단, 즉 소호효과를 나타낸다. 대기압 조건에서 SF<sub>6</sub> 가스의 파괴전압은 공기의 약 3배이며, 더욱이 열전도성이 우수하고

또한 방전 및 섬락 시 고기압 조건에서 분해된 후의 자기회복성(self-healing)도 우수하다. 또한, 안정성을 가진 대부분의 분해 부산물은 절연내력 저하에 크게 기여하지 않을 뿐만 아니라 여과법으로 제거 가능하다. SF<sub>6</sub> 가스는 섬락시에 중합반응을 일으키거나 탄소 또는 도전성 퇴적물을 생성하지 않으며, 200℃까지의 온도에서 전기설비에 사용되는 대부분의 고체절연재료 및 도전재료와 화학적 양립성(compatibility)을 가진다. 우수한 절연특성 및 열전도성 외에도, 용기에 용입되었을 때 SF<sub>6</sub> 가스는 실온에서 상대적으로 높은 압력을 가진다. SF<sub>6</sub> 가스의 액화압력은 21℃에서 약 2,100 kPa이며, 그 비점은 -63.8℃로 상당히 낮아 SF<sub>6</sub> 가스 절연설비에는 400-600 kPa 정도의 압력으로 용입된다. 이 가스는 실온에서 압력에 의해 쉽게 액화되며 이에 의해 금속제 원통용기 내에 압축저장(compact storage)이 가능하다. 이에 따라 취급과 사용이 용이하며, 현재까지 비교적 염가로 신뢰성있게 입수 가능하다. 그 결과 전기분야 산업체에서는 SF<sub>6</sub> 가스를 전기설비에 익숙하게 이용해 왔고 장기간에 걸친 축적된 경험을 갖고 있다.

그러나 SF<sub>6</sub> 가스는 다음과 같은 몇 가지 소망스럽지 못한 특성도 있다: 방전시 고독성·고부식성 화학물 형성; 이 화학물로부터 공기나 CH<sub>4</sub>와 같은 비극성 오염물질 제거곤란성; 수증기, 도전성입자 및 도체 표면거칠기에 대한 파괴전압의 민감성; 저온조건(-50℃ 이하)에서 SF<sub>6</sub> 가스가 부분적으로 액화되는 경우와 같이 주위 환경에 따라 아주 낮은 온도에서 나타나는 비이상적인 기체 거동(gas behaviour) 등이 그것이다. 또한 전술한 바와 같이 SF<sub>6</sub> 가스는 적외선 흡수력이 크고, 화학적 불활성 때문에 지구 대기권으로부터 신속히 제거되지 못한다. 이 마지막 두가지 성질 때문에 그 화학적 불활성으로 성층권 오존 파괴에 관해 영향이 없음에도 불구하고 1997년 12월 일본 Kyoto에서 개최된 제3차 당사국회의(COP3, 지구온난화방지 Kyoto 회의)에서, 온실효과를 가진 배출규제 대상가스로서, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC에 더하여 SF<sub>6</sub> 가스도 지정된 것이다. 이에 따라 SF<sub>6</sub> 가스의 배출량이 정식으로 보고되어야 할 뿐만 아니라, 현재 이 가스의 주된 사용자인 증전회사는 이 가스의 사용에 대한 정당성과 또한 동시에 환경에 대한 보존성을 제시할 수 있어야 하게 되었다[3]. 본 논문에서는 환경부하저감 차원에서 현재 활발히 진행되고 있는 SF<sub>6</sub> 대체가스 연구동향에 대해 조망해 본다.

## 2. 전력산업과 SF<sub>6</sub> 가스

SF<sub>6</sub> 가스는 전력산업 분야에서 전기절연용으로, 특히 송전 및 배전용 기기의 소호/전류차단용으로 널리 이용되고 있다. 일반적으로 절연이나 차단용으로 SF<sub>6</sub> 가스를 사용하는 기기에는 4가지 유형이 있다: 즉, 가스절연차단기(GCB : gas-insulated circuit breaker), 가스절연송전선(GIL 또는 GITL : gas-insulated transmission line), 가스절연변압기(GIT : gas-insulated transformer) 및 GIS (gas-insulated substation)이다. 이 용도로 전세계 SF<sub>6</sub> 가스 생산량의 80% 정도가 전력산업체에서 사용되고, 그 중 대부분이 가스절연차단기용으로 사용되는 것으로 추정되고 있다[1-3]. 가스절연설비는 현재 전세계적으로 송전 및 배전시스템의 주요소로 되어 있으며, 거의 전적으로 SF<sub>6</sub> 가스를 사용하고 있다. 이들 설비에 의해 사용부지 절감, 심미적 허용치, 무선 및 음성잡음신호의 상대적 방출 저감 등이 달성되어 변전소를 수용가에 매우 가까운 도심지에 설치할 수 있게 된 것이다.

가스절연설비는 특정 기능에 따라 최우선적으로 고려되어야 할 요소 즉 기체 특성이 다르다. 차단기용으로는, 열 및 절연회복성(저항 증가에 따른 짧은 시정수)과 함께, SF<sub>6</sub> 가스의 우수한 열전도도와 높은 절연내력이 대용량화에 대한 주된 고려 요소이다. 이들 특성은 SF<sub>6</sub> 가스가 도전상태(arc plasma)에서 아크의 절연상태로 신속하게 전이되고 또한 회복전압의 상승에 대해 내전압효과를 가지게 한다. SF<sub>6</sub>-계 차단기는 그 성능면에서 고압공기분사차단기나 진공차단기와 같은 대체장비에 비해 우수하다. 가스절연변압기[4]의 경우, 유전특성 상의 이점에 더해, 냉각성능, 고체재료 양립성 및 SF<sub>6</sub> 가스의 부분방전특성으로부터 이 가스가 이 설비에 바람직한 매질로 평가되었다. SF<sub>6</sub> 가스 절연은 유절연에 비해, 전하축적에 의한 절연파괴 회피, 무인화에 의한 안전문제, 고신뢰성, 설계배치의 유연성, 유지보수 경감, 보호절연(protected insulation), 서비스 수명 연장, 잡음 경감, 취급용이성 제고 및 설비 경량화 등을 포함하여 현저한 이점을 가진다. 가스절연송전선[5]의 경우 현장 조건 하의 기체매질의 절연내력이 가장 중요한 고려 요소로서, 특히 금속입자 오염시의 기체절연체 유전특성, 스위칭 임펄스 및 뇌임펄스 특성, 그리고 급속 과도스트레스 특성이 중요하다. 또한 절연기체는 도체로부터 외함으로 열을 전달함에 있어 효율이 높아야 하고 장기간(이를테면 40년)에 걸쳐 안정해야 한다. SF<sub>6</sub>-절연송전선은 다음과 같은 현저한 장점을 가진다: 비용효율성, 대량 수송성, 저손실성, 모든 전압계급에 대한 적용성, 발화사고에 대한 비위험성, 신뢰성, 혼잡지역에서의 고압가공송전선에 대한 소형경량화에 대한 대안, 그리고 고압가공송전선에 대한 공공관심(public concern)의 회피 등이다.

CO<sub>2</sub>SF<sub>6</sub> 가스의 사용이 지속적으로 증대되어 옴에 따라 그 수요도 증가되어 왔으며, 세계의 SF<sub>6</sub> 가스 생산량은 1995년 기준으로 약 8,500톤으로 추정되고 있다[4]. 이에 따라 대기 중의 SF<sub>6</sub> 가스의 농도도 증가하게 되었다 [6-8].

그림 1에서도 알 수 있는 바와 같이 최근의 관측 결과에 의하면[7], 대기 중 SF<sub>6</sub> 가스의 양은 지난 1980년대 겨울 관측 가능한 수준에서 근래의 약 3.7 pptv (pptv:parts per trillion by volume) 수준까지 연간 약 8.7%의 비율로 증가해 왔다. 대기 중 SF<sub>6</sub> 농도는, 그 배출율에 대한 가정에 따르면[7,8], 그림 1에서도 알 수 있는 바와 같이 2010년 경에는 10pptv에까지 이를 것으로 예상되고 있다. 기본적으로 각종 산업분야에서 사용되는 SF<sub>6</sub>는 회수(recover) 불가능하며, 전력산업분야에서 생기는 SF<sub>6</sub>의 환경으로의 배출(release)은 설비로부터의 정상적인 누출, 유지·보수, 교정, 시험 등에 기인한다. SF<sub>6</sub>를 실질적으로 파괴하는 처리법(disposal method)을 이용하지 않는 이상 현재까지 생산되었거나 앞으로 생산될 모든 SF<sub>6</sub>는 궁극적으로 대기 중에 합입된다.

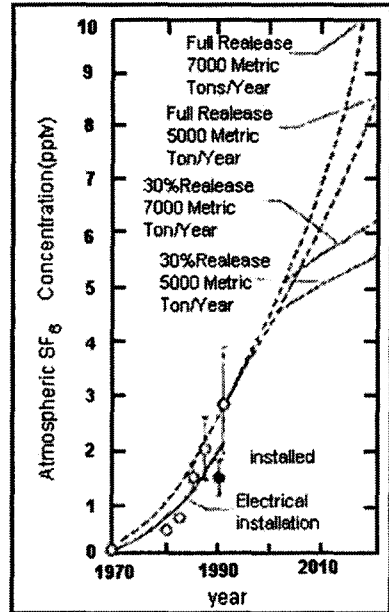


그림 1. 시간 경과에 대한 함수로 도시한 SF<sub>6</sub> 대기 농도. 실선은 과거의 기체절연설비로부터의 총누적 SF<sub>6</sub> 추정치를 나타내고 하얀색 점은 대기 잔존농도 측정치, 검은색 점은 1990년 기준으로 전세계 전기설비 중에 봉입된 SF<sub>6</sub>가 대기 중으로 배출된 경우를 가정한 추정농도이며, 점선은 각 가정 하에서의 예상증가량을 표시[7]

일본의 경우에는 전세계 생산량의 약 30%인 연간 약 2,500톤이 생산되며, 그 중 약 650톤이 대기 중으로 배출되는 것으로 알려져 있다[9]. 그 요인으로서, 주로 증전기기 제조업체 측에서의 수송시 기기분해에 의한 배출, 공장 내에서의 개발 시험 및 현지에서의 설치시험시의 배출 등(연간 약 400톤)을 들 수 있으며, 또한 가스 제조업체 측에 의한 제조 공정 중에서의 배출(연간 약 200톤), 전력회사에서의 내부해방점검에 의해 회수되지

않는 누설분(연간 약 50톤) 및 GIS 등으로부터의 자연누설(연간 수톤 정도) 등이 거론되고 있다[9]. 이러한 배경에 의해 일본의 경우 전력업계에서는 기기점검시의 SF<sub>6</sub> 가스의 회수율 향상이나 점검내용, 주기 등을 재평가함으로써 그 배출 삭감을 목표로 하고 있다. 그러나 봉입형 전력계통설비로부터의 SF<sub>6</sub> 누설율을 현재의 1% 수준에서 향후 0.5% 수준으로 향상시킨다 하더라도 봉입상태로부터 누출되는 SF<sub>6</sub>를 억제(controlling)하거나 파괴시킬 수 있는, 경제적으로 도입 가능한 처리기법이 현재로서는 없기 때문에 지구 환경으로 배출(release)되는 SF<sub>6</sub>를 효과적으로 감축시킬 수는 없다.

그러나 SF<sub>6</sub> 누설율의 저감과 재활용율의 제고는 SF<sub>6</sub> 생산 수요를 삭감하여 결과적으로 지구환경으로 배출되는 SF<sub>6</sub>량을 감소시키게 되므로 우선도가 높은 대처 방안이 된다. 실제로 최근 전력분야 산업체에서 SF<sub>6</sub>-절연설비의 가스압과 SF<sub>6</sub> 배출량을 보다 효과적으로 감시할 수 있는 방안이 제시되고 있다[3]. 여기에는 누설의 정량화 및 방지(stop)를 위한 개선된 기법, 펌핑 및 보관처리(storage procedures) 개선책, 재활용 기준 설정, 설비 밀봉구조 개선, 누설율이 높은 구형 설비의 점진적 교체, SF<sub>6</sub>의 사용(using), 취급(handling) 및 추적(tracing)에 대한 전반적 정책 제정 등이 포함된다. 이와 같은 노력은 부분적으로 SF<sub>6</sub>의 사용과 수송에 대한 규제 및 억제에 대한 전방에서 촉발된 것이나, 총체적 관심은 SF<sub>6</sub>가 잠재적 온실가스라는 단 한가지 이유에 기인하고 있다.

### 3. SF<sub>6</sub> 대체가스 절연특성 연구동향

현재 및 장래에 있어 가스절연은 환경적으로 수용 가능하여야 한다. 따라서 지구온난화에 대한 SF<sub>6</sub>의 가능한 영향(impact)에 관한 최상의 대책은 SF<sub>6</sub>의 배출을 방지하는 것이다. 명백히 이를 위한 가장 효율적인 방법은 SF<sub>6</sub>를 전혀 사용하지 않는 것이나 가까운 장래에 SF<sub>6</sub> 사용을 배제한다는 것은 산업적 및 사회적 관점에서 예상하기 어렵다. 그러나 이와 같은 주장에 따라 대체가스에 대한 조사와 아울러 고전압절연용 대체기술에 대한 필요성이 증가되고 있다. SF<sub>6</sub> 대체용 기체절연체를 찾기는 표면적으로 보기보다 아주 어려운 문제이다. 왜냐하면 기체재료가 만족해야 할 기초적 및 실용적 요구조건이 많고 수많은 연구와 시험이 수행되어야 하기 때문이다. 예를 들어 절연용 기체재료는 절연내력이 높아야 하는데 이는 그 기체가 전기부성기체이어야 함을 뜻하나 전기부성효과가 큰 기체는 일반적으로 독성, 화학적 활성, 환경손상성이 있고 그 증기압이 낮으며 또한 각종 기체방전 유형(type)에서 그 분해과정이 다양하면서도 아직 미지의 경우가 많다. 질소와 같은 환경친화적 비전기부성기체는 일반적으로 그 절연내력이 낮다. 예를 들어 질소는 SF<sub>6</sub>에 비해 그 절연내력이 약 1/3 정도 수준으로 차단기에 독자적으로 사용되기에는 그 기본적인 요구조건에 미달된다. 그럼에도 불구하고 이와 같은 환경친화적 기체는 보다 고압상태로 독자적으로 사용되거나 또는 상대적으로 낮은 기압에서, 수 %의 분압 조건에서

SF<sub>6</sub>을 포함한 혼합가스의 주성분으로 사용되어질 수 있다. SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스는 과거로부터 현재에 이르기까지, 차단기에서 사용하는 압력 조건하에서 SF<sub>6</sub>가 응축되어 그 전류차단능이 저하되는 가혹한 기후조건(T<-40°C)에서 사용되어져 오고 있다. 그와 같은 용도에 있어서는 SF<sub>6</sub> 50%를 포함한 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스가 유효한 전류차단 매질로 알려져 있으며[10], SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub>나 SF<sub>6</sub>/He를 포함한 여타 혼합가스도 이용되고 있다[11].

SF<sub>6</sub> 대체물질의 탐구는 수년 전으로 거슬러 올라가며, 특히 SF<sub>6</sub>보다 우수한 기체를 찾고자 했던 1970년대와 1980년대에 활발하였다. 이 기간 동안 수행되었던 여러 연구 결과에 의해 수많은 유용한 정보가 축적되었으며[1], 이들 결과는 SF<sub>6</sub> 보다 우수한 기체 재료를 찾기 위해서가 아니라 환경적으로 수용 가능하고 그 유전특성 및 성능이 SF<sub>6</sub>에 비견될 만한 기체/혼합기체를 찾기 위해 재검토되어야 할 것이다.

이와 같은 과정에서 최근 SF<sub>6</sub>/완충기체(buffer gas)에 의한 혼합가스(gas mixture)는, SF<sub>6</sub> 가스의 사용량 삭감에 효과적인 대책으로서 주목받고 있다. SF<sub>6</sub> 가스를 포함한 혼합가스의 큰 이점은 절연성능에 있어서 (+)의 상승효과(synergism)가 나타나는 점이다[12]. 특히 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스는, 지구온난화에 기여하지 않는 무해·안정한 질소 가스의 사용에 의해 (+)의 상승효과가 현저히 나타난다는 점에서 SF<sub>6</sub> 가스의 대체가스로 주목받아 활발히 연구되어 오고 있다.

SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스 중의 갭간 절연특성에 관한 연구 동향으로서는 전력기기의 절연설계의 기본이 되는 준평등전계 하에서, 주로 뇌임펄스 인가시의 절연파괴전압 측정 등이 수행되어 왔다[13]. 그러나 최근에는 불평등전계 하에서의 절연파괴특성에 대한 연구결과도 보고되고 있다[14].

한편 실용 전력기기의 경우에는, 금속이물질 등의 혼입에 의해 기기 내에서 불평등전계가 형성됨으로써 부분방전(PD)을 경유하여 절연파괴가 발생할 가능성이 있으며, 이에 대해서는 Gallimberti[15] 등이 공기 및 SF<sub>6</sub>(1%)/Air(99%) 혼합가스 중 PD의 전류파형과 발광상 관측 결과로부터 PD의 진전특성을 검토한 바 있다. Ward[16]는 금속이물질에 의한 오염 발생시 순 SF<sub>6</sub>에 비해 질소, 공기 그리고 CO<sub>2</sub> 등과의 혼합가스의 경우 절연내력의 저하효과가 개선된다는 현상을 보고하고 있다.

이와 같이 SF<sub>6</sub> 대체가스의 갭간 절연특성에 관한 연구는 종래 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스를 중심으로 활발히 진행되어 왔다. 그러나 전술한 바와 같이 최근에 이르러 완충기체로서 CO<sub>2</sub>가 상당히 적극적으로 검토되어 SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> 혼합가스에 대한 연구가 활발하다. Qiu[17,18] 등은 GIT에 적용하는 경우 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>에 비해 SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub>의 절연특성이 우수하다고 보고하고 있으며, 또한 상당히 강한 불균일전계 조건에서 순 SF<sub>6</sub>에 비해 SF<sub>6</sub>/Air와 SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> 혼합가스가 보다 높은 충격전압 최소파괴치를 보임을 보고하고 있다. 한편 Ohtsuka 등은[19,20] 50%SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스에 1%의 CO<sub>2</sub>를 부가함으로써 파괴전압최대치가 50% SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스 및 순 SF<sub>6</sub>에 비해 각각 1.31배 및 1.15배 증가하는 것으로 보고하고 있다.

#### 4. 결 론

우수한 절연성능과 소호성능을 가지고 있는 SF<sub>6</sub> 가스의 사용이 지구온난화문제를 배경으로 하여 국제적으로 규제되는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 여건 하에서 환경을 배려한 차세대의 전력기기·시스템을 구축하기 위해 새로운 절연·소호매체의 개발이 시급한 실정이다. 전술한 바와 같이 현재까지 SF<sub>6</sub> 대체가스로는 완충기체로 질소를 사용한 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스가 주로 검토되어 왔는데 이는 질소가 저렴한 불활성기체이고 또한 평등전계 하에서의 그 절연강도가 여타 SF<sub>6</sub>계 혼합가스에 비해 높기 때문이었다.

그러나 실용적인 측면에서 중요한 불평등전계 하에서의 절연특성에서 완충기체로서의 CO<sub>2</sub>의 우수성이 보고되면서 현재에는 SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> 또는 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 혼합가스가 SF<sub>6</sub> 대체가스로 주목받아 활발히 연구되고 있다. 비록 CO<sub>2</sub> 자체가 온실가스이기는 하나, 전력기기로부터 누설되는 CO<sub>2</sub> 배출은 화석연료의 연소나 자동차 배기가스의 경우에 비해 무시할만한 수준이며, 더욱이 CO<sub>2</sub>는 SF<sub>6</sub>에 비해 그 수명이 훨씬 짧아 환경에 대한 영향(impact)은 충분히 미미하기 때문에 SF<sub>6</sub> 가스를 완전히 대체할 수 있는 단일 기체 절연·소호매체를 찾을 수 없는 현 시점에서 N<sub>2</sub> 나 CO<sub>2</sub> 등의 완충기체를 이용한 혼합가스는 SF<sub>6</sub>에 의한 환경영향(environmental impact)을 저감시킬 수 있는 최선의 대안으로 주목되어 활발히 연구되고 있는 실정이다.

#### [참 고 문 헌]

[1] L.G.Christophorou(ed.), Gaseous Dielectrics, Volumes, I-V, Pergamon Press, New York, respectively, 1978, 1980, 1982, 1984, 1987; Volumes VI and VII, Plenum press, New York, respectively, 1990 and 1994.  
[2] A.H. Cookson, "Gas-Insulated Cables", IEEE. Trans Electr. Insul., Vol. EI-20, pp.859-890, 1985.  
[3] N.Bernard, S.Theoleyre, G.Valentin, "How to use a Greenhouse Effect Gas while being Environmentally Friendly: SF<sub>6</sub> Case in Medium Voltage Distribution", CIRED2001, IEE Conference Publication No.482, 18-21 June 2001  
[4] C.T.Wan, A.Kudo, M.Asakura, Y.Murakami, K.Itoh, T.Nishitani, T.Yoshikawa : "Development of 275kV Gas Cooled Type Gas-Insulated Power Transformer", *Gaseous Dielectrics VII*, pp.539-545, 1994  
[5] H.Okubo, T.Hoshino, T.Takahashi, M.Hikita, A.Miyazaki : "Insulation Design and On-site Testing Method for a long Distance, Gas Insulated Transmission Line(GIL)", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol.14, No.6, pp.13-22, 1998  
[6] 新エネルギー・産業技術総合開発機構研究報告書 : 環境低負荷形新絶縁・消弧媒體の開発と電力器機への適用 (1999)  
[7] M.Maiss, I.Levin, "Global Increase of SF<sub>6</sub> Observed in the Atmosphere, Geophys. Res. Lett., Vol.21, pp.569-572. 1994.  
[8] M.K.W. Ko, N.D. Sze, W-C Wang, G. Shia, A. Goldman, F.J. Murcray, D.G. Murcray, and C.P. Rinsland,

"Atmospheric Sulfur Hexafluoride: Sources, Sinks and Greenhouse Warming", *J.Geophys. Res.*, Vol.98, pp.10 499-10 507, 1993.

[9] 電氣協同研究會 電力用 SF<sub>6</sub>가스取扱基準專門委員會編 : 電力用 SF<sub>6</sub>가스取扱基準, 電氣協同研究 第54卷 第3号 (1998)  
[10] A.Lee, L.S. Frost, "Interruption Capability of Gases and Gas Mixtures in a Puffer-Type Interrupter" : *IEEE Trans. Plasma Science*, Vol. Ps-8, pp.362-367, 1980.  
[11] B.Chervy, H.Riad, A.Gleizes, and J.J. Gonzalez, "Interruption Capability of SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub> and SF<sub>6</sub>/C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> Mixtures", *Eleventh Intern. Conf. Gas Discharges and Their Applications*, pp.I-334-I-337, Chuo University, Tokyo, Japan, 1995.  
[12] S.R.Hunter, L.G.Christophorou : "Pressure- dependent Electron Attachment and Breakdown Strength of Unitary Gases, and Synergism of Binary Gas Mixture: A Relationship", *Gaseous Dielectrics IV*, pp.115-127, 1984  
[13] D.Zheng, P.Zhang, G.Gong, Z. Wen : "Study about the Electrical Behaviour of the Binary Gaseous Mixtures of SF<sub>6</sub>", *Proc. of 1998 Intern. Symp. on Elect. Insul. Mater.*, Toyohashi, Japan, Sept. 27-30, pp.437-440, 1998  
[14] 山田達司, 高橋俊裕, 戸田恒雄, 大久保仁, "各種ガスとSF<sub>6</sub>による混合ガス中における部分放電の発生メカニズム", *電氣學會論文誌B*, 118卷 7/8号, pp.837-842, 1998  
[15] I.Gallimberti : "Breakdown Mechanism in Electronegative Gases", *Gaseous Dielectrics V*, pp. 61-79, 1987  
[16] S.A.Ward : "Optimum SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>-Air, SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> Mixtures Based on Particle Contamination", *Conf. Record of the IEEE Intern. Symp. on Elect. Insul.*, Anaheim, CA USA, April 2-5, 2000  
[17] Y.Qiu, E.Kuffel, "Comparison of SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> Gas Mixtures as Alternatives to SF<sub>6</sub> Gas", *IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, Vol.6 No.6, pp.892-895 Dec. 1999  
[18] X.Q. Qiu, I.D. Chalmers, P.Coventry : A study of alternative insulating gases to SF<sub>6</sub>", *J.Phys.D:Appl. Phys.* 32, pp.2918-2922, 1999  
[19] 大塚信也, 永良俊治, 高村正樹, 橋本洋助, 中村道昭, 匹田政幸, "不平等電界下におけるCO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/50%SF<sub>6</sub> 混合ガスの絶縁特性", *電氣學會論文誌B*, 121卷 7号, pp.830-836, 2001  
[20] S.Ohtsuka, S.Nagara, K.Miura, M.Nakamura, M.Hikita, "Effect of Mixture of a Small Amount of CO<sub>2</sub> in SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> Mixed Gas on the Insulation Performance under Nonuniform Field", *Conf. Record of the 2000 IEEE Intern. Symposium on Electrical Insulation*, Anaheim, CA USA, April 2-5, pp.288-291, 2000