

# 環境調和形電力系統の構築に関する研究

—太陽光発電装置大量導入時における電力系統の解析技術の確立と

高温 SF<sub>6</sub> 代替ガスの絶縁特性の解明—

津坂 亮博

2023 年 3 月

愛知工業大学大学院工学研究科

博士後期課程 電気・材料工学専攻



|       |   |        |
|-------|---|--------|
| 第 1 章 | 緒論  | - 1 -  |
| 1.1   | 日本のエネルギー政策の推移   | - 1 -  |
| 1.2   | 地球温暖化への対応   | - 3 -  |
| 1.3   | 再生可能エネルギー   | - 5 -  |
| 1.3.1 | 再生可能エネルギー利用の促進  | - 5 -  |
| 1.3.2 | 太陽光発電装置の普及  | - 7 -  |
| 1.3.3 | PV 装置の大量導入が電力系統へ与える影響と課題                              | - 8 -  |
| 1.4   | 環境低負荷ガスを利用したガス遮断器                                     | - 9 -  |
| 1.4.1 | SF <sub>6</sub> の規制と代替ガスの候補                           | - 9 -  |
| 1.4.2 | 遮断器における交流電流遮断過程                                       | - 10 - |
| 1.4.3 | ガス遮断器におけるノズル材料の溶発現象                                   | - 12 - |
| 1.5   | 本研究の目的と概要   | - 13 - |
|       | 第 1 章の参考文献  | - 15 - |
| 第 2 章 | 高圧配電システムの末端に大容量 PV 装置が接続された場合における PV 装置連系点電圧の逆潮流電流依存性 | - 23 - |
| 2.1   | はじめに  | - 23 - |
| 2.2   | PV 装置が力率 1 で運転している場合                                  | - 23 - |
| 2.2.1 | 想定した配電システムモデルとベクトル軌跡                                  | - 23 - |
| 2.2.2 | PV 装置連系点電圧の表式と許容最大逆潮流電流                               | - 26 - |
| 2.2.3 | PV 装置連系点電圧が最大になる条件                                    | - 27 - |
| 2.2.4 | 上昇・低下メカニズム  | - 28 - |
| 2.2.5 | 逆潮流電流依存性に関する定量的検討                                     | - 30 - |
| 2.3   | PV 装置が進み力率運転している場合                                    | - 32 - |
| 2.3.1 | ベクトル図   | - 32 - |
| 2.3.2 | ベクトル軌跡  | - 32 - |
| 2.3.3 | PV 装置連系点電圧の表式と許容最大逆潮流電流                               | - 34 - |
| 2.3.4 | PV 装置連系点電圧が最大になる条件                                    | - 36 - |
| 2.4   | おわりに  | - 38 - |
|       | 第 2 章の参考文献  | - 38 - |
| 第 3 章 | 高圧配電システムの末端に大容量 PV 装置が接続された場合の電力潮流とその有効利用             | - 39 - |
| 3.1   | はじめに  | - 39 - |
| 3.2   | 力率 1 運転の場合  | - 39 - |
| 3.2.1 | 有効電力の表式   | - 39 - |
| 3.2.2 | PV 装置から出力できる最大許容有効電力                                  | - 40 - |
| 3.2.3 | PV 装置から出力できる最大許容有効電力の表式                               | - 41 - |

|       |  |        |
|-------|--|--------|
| 3.2.4 | PV 装置連系点電圧と PV 装置からの出力有効電力に関する定量的検討 .....                              | - 43 - |
| 3.2.5 | 配電用変電所に流入する最大有効電力 .....  | - 44 - |
| 3.3   | 大容量 PV 装置が接続された高圧配電系統における有効電力(進み力率運転の場合) .....                         | - 46 - |
| 3.3.1 | 有効電力の表式 .....  | - 46 - |
| 3.3.2 | PV 装置から出力される最大許容有効電力 .....   | - 47 - |
| 3.3.3 | 配電用変電所に流入する最大有効電力 .....  | - 48 - |
| 3.3.4 | PV 装置連系点電圧ベクトル $V_r$ と配変送出電圧ベクトル $V_s$ の位相角 $\theta$ .....             | - 49 - |
| 3.3.5 | 配電用変電所に流入する有効電力が最大になる場合の位相角 $\theta_{psm}$ .....                       | - 50 - |
| 3.3.6 | PV 装置から出力される最大有効電力の力率依存性 .....   | - 51 - |
| 3.3.7 | 配電用変電所に流入する最大有効電力の力率依存性 .....  | - 52 - |
| 3.3.8 | 線路インピーダンスの影響 .....   | - 52 - |
| 3.4   | PV 装置から出力された有効電力と配電用変電所に流入する有効電力との関係 ....                              | - 52 - |
| 3.5   | 配電用変電所に流入する有効電力が最大となる場合の PV 装置の出力電力と PV 装置<br>が出力できる最大許容有効電力との関係 ..... | - 53 - |
| 3.6   | PV 装置連系点電圧 $V_r$ と PV 装置からの出力電力 $P_r$ との関係性に関する考察 .....                | - 55 - |
| 3.6.1 | 力率 $\cos\phi$ 運転時における PV 装置連系点電圧 $V_r$ の $P_r$ 依存性 .....               | - 55 - |
| 3.6.2 | 力率 $\cos\phi$ 運転時における PV 装置から出力できる最大許容電力 $P_{rmax}$ .....              | - 56 - |
| 3.6.3 | 配電用変電所に流入する最大有効電力からみた PV 装置の最適な容量 .....                                | - 57 - |
| 3.6.4 | 定量的検討 .....  | - 57 - |
| 3.7   | おわりに .....   | - 60 - |
| 第 4 章 | 高圧配電系統の末端に大容量 PV 装置が接続された場合の配電線路上の電圧分布 .....                           | - 61 - |
| 4.1   | はじめに .....   | - 61 - |
| 4.2   | 想定した配電系統モデル .....  | - 61 - |
| 4.3   | 電圧分布を表すベクトル図 .....   | - 61 - |
| 4.4   | 線路途中の電圧分布の表式 .....   | - 65 - |
| 4.5   | 電圧分布の逆潮流電流依存性に関する定量的検討 .....   | - 65 - |
| 4.6   | 電圧分布の線路長依存性に関する定量的検討 .....   | - 66 - |
| 4.7   | 電圧分布の出力有効電力依存性に関する定量的検討 .....  | - 69 - |
| 4.8   | おわりに .....   | - 70 - |
| 第 5 章 | PTFE 溶発蒸気が混入した高温 CO <sub>2</sub> ガスの絶縁特性 .....                         | - 73 - |
|       | 本章で利用する記号 .....  | - 73 - |
| 5.1   | はじめに .....   | - 73 - |
| 5.2   | 高温ガスにおける換算電離係数と換算付着係数の計算方法 .....                                       | - 74 - |
| 5.3   | PTFE 溶発蒸気が混入した高温 CO <sub>2</sub> ガスの粒子組成 .....                         | - 76 - |

|       |   |         |
|-------|---|---------|
| 5.4   | 電子衝突断面積.....  | - 78 -  |
| 5.5   | 換算臨界電界の推定.....  | - 80 -  |
| 5.5.1 | 換算臨界電界の推定手順.....  | - 80 -  |
| 5.5.2 | 1,000 K における換算衝突電離係数と換算電子付着係数.....  | - 80 -  |
| 5.5.3 | 4,000 K における換算衝突電離係数と換算電子付着係数.....  | - 82 -  |
| 5.5.4 | 換算臨界電界の推定結果.....  | - 83 -  |
| 5.5.5 | 推定結果の妥当性.....   | - 85 -  |
| 5.6   | 換算臨界電界へ寄与する主たる衝突反応.....   | - 86 -  |
| 5.6.1 | ガス温度 1,000 K における主たる衝突反応.....   | - 86 -  |
| 5.6.2 | ガス温度 4,000 K における主たる衝突反応.....   | - 89 -  |
| 5.7   | 各温度および各 PTFE 溶発蒸気混入率におけるガスを構成する支配的な粒子.....  | - 91 -  |
| 5.8   | おわりに.....   | - 93 -  |
|       | 第 5 章の参考文献.....   | - 94 -  |
|       | 第 6 章 高温 CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> 混合ガスの粒子組成・臨界電界における C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O 添加と PTFE 蒸気混入との等価性.....  | - 99 -  |
| 6.1   | はじめに.....   | - 99 -  |
| 6.2   | CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O 混合ガスと PTFE 溶発蒸気が混入した CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> 混合ガスとの等価性.....                                   | - 99 -  |
| 6.2.1 | CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O 混合ガスの各原子のモル分率.....  | - 100 - |
| 6.2.2 | CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /PTFE ガスの各原子のモル分率.....  | - 100 - |
| 6.2.3 | 等価条件式の導出.....   | - 101 - |
| 6.2.4 | CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O 混合ガスと等価な CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /PTFE ガスに関する検討.....  | - 101 - |
| 6.2.5 | CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /PTFE ガスと等価な CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O 混合ガスに関する検討.....  | - 102 - |
| 6.3   | CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O 混合ガスと PTFE 溶発蒸気が混入した純粋 CO <sub>2</sub> ガスとの等価性 ..   | - 104 - |
| 6.4   | CO <sub>2</sub> /C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O 混合ガスと PTFE 溶発蒸気が混入した CO <sub>2</sub> ガスとの等価性.....   | - 105 - |
| 6.5   | 等価な条件における高温ガスの粒子組成および換算臨界電界.....  | - 106 - |
| 6.6   | CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O 混合ガスと PTFE 溶発蒸気が混入した CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O 混合ガスとの等価性..... | - 106 - |
| 6.7   | CO <sub>2</sub> /C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O 混合ガスと PTFE 溶発蒸気が混入した CO <sub>2</sub> ガスとの類似性.....   | - 109 - |
| 6.7.1 | 一種類の原子のモル分率が等価になる条件.....  | - 109 - |
| 6.7.2 | 一種類の原子のモル分率が同じになるように混合した場合のそれ以外の原子の過不足割合.....   | - 112 - |
| 6.7.3 | 一種類の原子のモル分率をほぼ同じにした場合の換算臨界電界.....   | - 113 - |
| 6.8   | おわりに.....   | - 114 - |
|       | 第 6 章の参考文献.....   | - 115 - |
|       | 第 7 章 総括.....   | - 119 - |

|       |  |         |
|-------|--|---------|
| 7.1   | 本論文の成果.....                              | - 119 - |
| 7.2   | 新たな課題と今後の展望.....                         | - 121 - |
| 7.2.1 | 大容量 PV 装置が接続された配電系統の研究に対する今後の課題.....     | - 121 - |
| 7.2.2 | SF <sub>6</sub> 代替ガスの探索の研究に対する今後の課題..... | - 121 - |
|       | 謝辞.....                                  | - 123 - |
|       | 公表した研究成果.....                            | - 125 - |

# 第1章 緒論

## 1.1 日本のエネルギー政策の推移

図 1-1 には、日本の一次エネルギーの国内供給の推移を示している<sup>[1]</sup>。日本におけるエネルギー需要は、1960 年以降急速に増加している。これ以前には、国産の石炭がエネルギー供給の中心を担っていたが、その後、国産の石炭の価格に比べ中東の石油が安価になったこと及び国内諸物価の上昇による石炭採掘コストの上昇を背景として、徐々に石油の利用が増加していった<sup>[2]</sup>。これにより、日本の一次エネルギーの国内供給は石炭から石油にシフトし、その後も国内炭鉱の閉山が進み、その結果、2002 年 3 月までに北海道の一部の露天掘り炭鉱を除き全ての炭鉱が閉山した。1964 年の東京オリンピックの開催による高速道路を含む道路整備の加速化を背景とするモータリゼーションの進展により、ガソリンと軽油の需要増加も相まって、1973 年には、一次エネルギー国内供給の 75.5%が石油となった<sup>[3]</sup>。この高度経済成長期において、最も優先された指針は、「経済効率性(Economic efficiency)」である<sup>[3]</sup>。

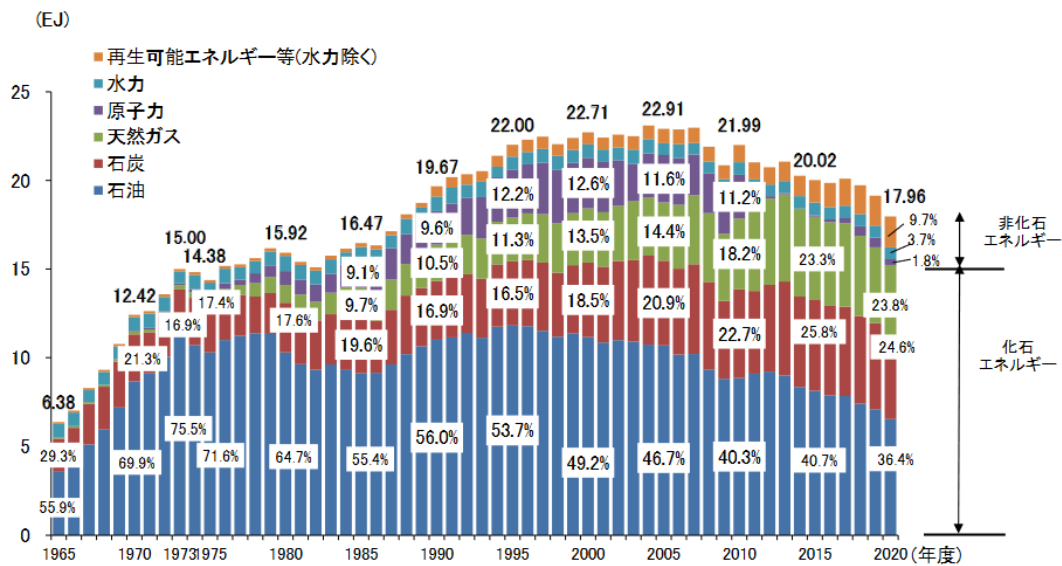
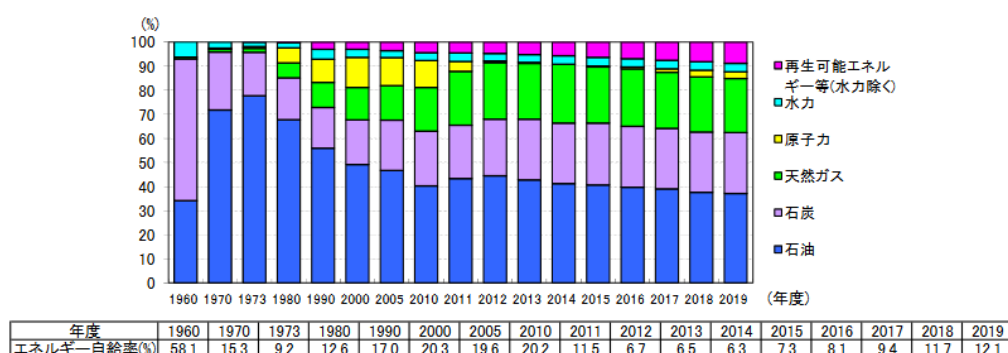


図 1-1 日本の一次エネルギー供給の推移<sup>[1]</sup>

出典: 経済産業省資源エネルギー庁「令和 3 年度エネルギーに関する年次報告」

しかしながら、1970 年台には、1973 年の第四次中東戦争、1979 年のイラン革命によって発生したオイルショックの影響で、原油価格が高騰し、日本経済が脅かされた。このような、石油供給断絶の不安を経験した日本は「エネルギーの安定供給(Energy security)」の重要性を認識し、エネルギーの大半を海外に依存するこれまでのエネルギー政策の転換を進めた。具体的には、石油に代わるエネルギーとして、原子力、天然ガス、石炭などの多様なエネルギーを利用する「エネルギーミックス」という考え方が提案された<sup>[4][5]</sup>。その結果、一次エネルギー国内供給に占める石油の割合は、2010 年度には 40.3%にまで減少した。図 1-2 には、日本の一次エネルギー国内供給構成および自給率の推移を示している<sup>[2]</sup>。同図より、1970 年以降、石油の利用率が減少し、新たに、天然ガスや原子力の利用率が増加している。原子力は国産エネルギーとみなせるので、1973 年には 9.2%であったエネルギー自給率は 2000 年には 20.3%まで増加し、エネルギーミックスを取り入れたことによりエネルギーの安定供給が向上したことがわかる。

1990 年に気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)の第一次評価報告書が発表された<sup>[6]</sup>。これは、1988 年 11 月にジュネーブにて開催された「IPCC 第一回総会」にて作成が決定され、その後、世界中の研究者が地球温暖化に関する研究成果についての評価を行い、それらの結果をまとめたものである。この報告書は、「人為起源の温室効果ガスがこのまま大気中に排出され続ければ、生態系や人類に重大な影響をおよぼす気候変化が生じるおそれがある」という警告を発した。これが社会的に非常に注目された結果、1992 年 6 月に



(注1) IEAは原子力を国産エネルギーとしている。(注2)エネルギー自給率(%)=国内産出/一次エネルギー供給×100。

図 1-2 日本の一次エネルギー国内供給構成および自給率の推移<sup>[2]</sup>

出典:経済産業省資源エネルギー庁「令和 2 年度エネルギーに関する年次報告」



リオデジャネイロにおいて、気候変動に関する国際連合枠組み条約(UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change)が採択され、1995年から毎年同条約の締結国際会議(COP)で気候変動の緩和策や適応策の取り組みに関する交渉・決定が行われることになった<sup>[7]</sup>。このような背景から、日本のエネルギー政策を検討するうえでも「環境(Environment)」が重要視されるようになった。

2011年3月11日に発生したマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)は、国内観測史上最大規模の地震であり、大規模な津波を伴い、未曾有の大災害を引き起こした。また、この地震と津波の影響で、全電源を失った東京電力福島第一原子力発電所では、炉心の温度を低下させることができず、ついには炉心溶融が発生した。さらに、燃料棒と水蒸気が反応して、大量の水素が発生し、同月12日に1号機において、14日に3号機において、15日に4号機において水素爆発が発生した。この結果、事故は発電所内施設の損傷に留まらず、放射性物質が外部へと放出されることになった(福島原発事故)<sup>[8]</sup>。この事故をきっかけに、原子力の安全性に対する信頼は揺らぎ、原子力を電力供給の基幹としてきた日本のエネルギー政策は見直されることとなった。そのため、これまでのエネルギー政策(「経済効率性(Economic efficiency)」,「エネルギーの安定供給(Energy security)」,「環境(Environment)」)に「安全性(Safety)」が追加され、これを、それぞれの英語の頭文字から、3E+Sと表し、新たな日本のエネルギー政策として考えられるようになり、現在の第6次エネルギー基本計画でも重要な指標となっている<sup>[9][10]</sup>。なお、この福島原発事故以降、全国の原発が停止したことから、図1-2におけるエネルギー自給率は2011年以降大幅に減少した。

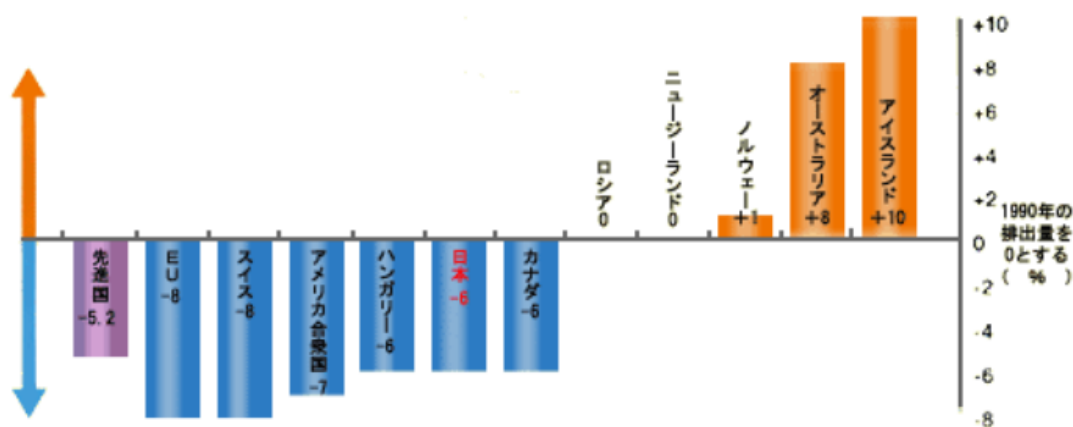
## 1.2 地球温暖化への対応

UNFCCCは、「温暖化防止のため大気中の温室効果ガスの濃度を安定させること」を究極の目的とし、地球温暖化がもたらす悪影響を防止するための国際的な枠組みを定めた条約で、1992年にリオデジャネイロにおいて採択され、1994年に発行された。先進国に対しては、「温室効果ガスの排出量を2000年までに1990年の水準に戻すことを目的」として義務を課した<sup>[11]</sup>。

1995年にベルリンで開催された第一回の締約国会議であるCOP1において、UNFCCCだけでは問題解決に不十分であるとの認識がなされ、2年間かけて議定書交渉を行うことが決定された(ベルリン・マンデート)。翌年のCOP2では、議定書が法的拘束力を持つものとして認定された(ジ

ユネーブ宣言)。1997年に京都で開催されたCOP3において、2年間の交渉の結果として、京都議定書が採択された<sup>[12]</sup>。この議定書は、参加している先進国に対して、「温室効果ガスを2008年から2012年の間に、1990年比で約5%削減すること」を要求した。さらに、図1-3に示すように、国ごとに温室効果ガス排出量の削減目標が定められ、EUにおいては8%、アメリカ合衆国は7%、日本は5%の削減を約束した<sup>[13][14]</sup>。この時、削減すべき温室効果ガスとしては、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)だけではなく、メタン(CH<sub>4</sub>)、一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)、ハイドロフルオロカーボン(HFCs)、パーフルオロカーボン(PFCs)、六フッ化硫黄(SF<sub>6</sub>)の計6種類のガスが対象とされた<sup>[14]</sup>。

2020年10月26日、菅内閣総理大臣は、所信表明演説において、日本が2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。また、2021年4月の地球温暖化対策推進本部および米国主催の気候サミットにおいて、「2050年目標と統合的で野心的な目標として、2030年度に、温室効果ガスを2013年から46%削減することを目指す。さらに、50%の高みに向けて、挑戦を続けていく」ことを表明した<sup>[15]</sup>。さらに、2021年10月に閣議決定された「第6次エネルギー基本計画」<sup>[9]</sup>では、基本的視点である3E+Sをベースとして、2050年カーボンニュートラル実現へ向けた課題と対応が明確に示された。カーボンニュートラルとは、図1-4で示しているように、温室効果ガスの排



\* 2007年12月末現在、アメリカ合衆国は未締結

図1-3 国ごとの温室効果ガス排出量の削減目標<sup>[14]</sup>

出典: 全国地球温暖化防止活動推進センター

出量から植林・森林などによる吸収量を差し引いて、その合計を実質的にゼロにするということである<sup>[16]</sup>。2050年カーボンニュートラル実現に向けて、電力部門では、再生可能エネルギーや原子力などの実用段階にある脱炭素技術を活用するとともに、水素・アンモニア発電や二酸化炭素回収・貯蔵(CCS: Carbon dioxide Capture and Storage)技術、カーボンリサイクルを前提とした火力発電などの技術を発展させ、脱炭素を図ることが挙げられている<sup>[17]</sup>。また、CO<sub>2</sub>以外にもCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HFCs、PFCs、SF<sub>6</sub>などの温室効果ガスの使用を抑制することも重要である。

## 1.3 再生可能エネルギー

### 1.3.1 再生可能エネルギー利用の促進

再生可能エネルギーは、資源に限りある化石資源とは異なり、一度利用しても比較的短時間で再生が可能であり、資源が枯渇せず繰り返し利用できるエネルギーとして、太陽光・風力・地熱・中小水力・バイオマスなどが挙げられる。これらのエネルギーを利用して発電する際には、温室効果

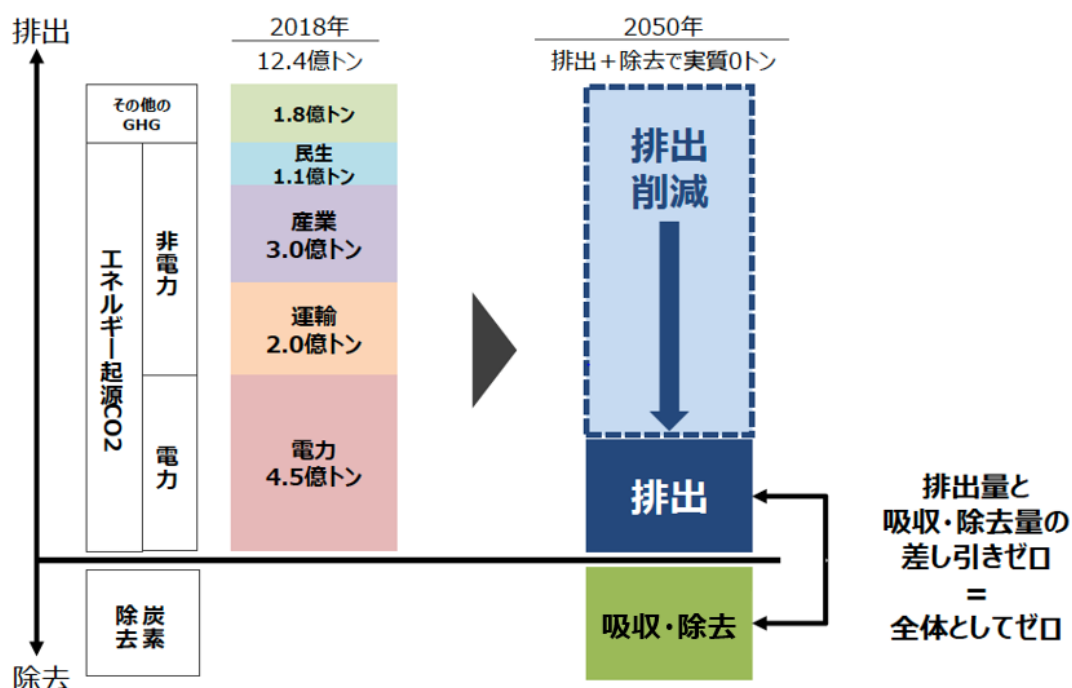


図 1-4 カーボンニュートラル概念図<sup>[16]</sup>

出典: 経済産業省資源エネルギー庁

ガスを排出しないため、環境に優しいエネルギーとして利用されている<sup>[18]</sup>。2019年における各国の総発電電力量に対する再生可能エネルギー由来の電力量の比率を図1-5に示す<sup>[19]</sup>。カナダが最も高く66.3%であり、ドイツやイギリス、スペイン、イタリアでは30%～40%であるのに対して、日本は18.0%、アメリカは16.8%である。

我が国の第6次エネルギー計画において、2050年カーボンニュートラル実現へ向けた野心的な目標として、電源構成における再生エネルギー比率を36%～38%にすることを目指している<sup>[20]</sup>。このような目標を達成するために、2012年に導入されたFIT(Feed in Tariff)制度に加えて、新たにFIP(Feed in Premium)制度を2022年4月から開始した。この制度は、再生可能エネルギーの導入が進む欧州などでは、既に取り入れられている制度であり、FIT制度のように再生可能エネルギーによって発電された電力を固定価格で買い取るのではなく、売電価格に対して一定の補助額を上乗せすることで再生可能エネルギーの導入を促進する制度である<sup>[21]</sup>。この制度により、再生可能エネルギー、特に一般家庭に導入しやすい太陽光発電がより普及していくと考えられている。

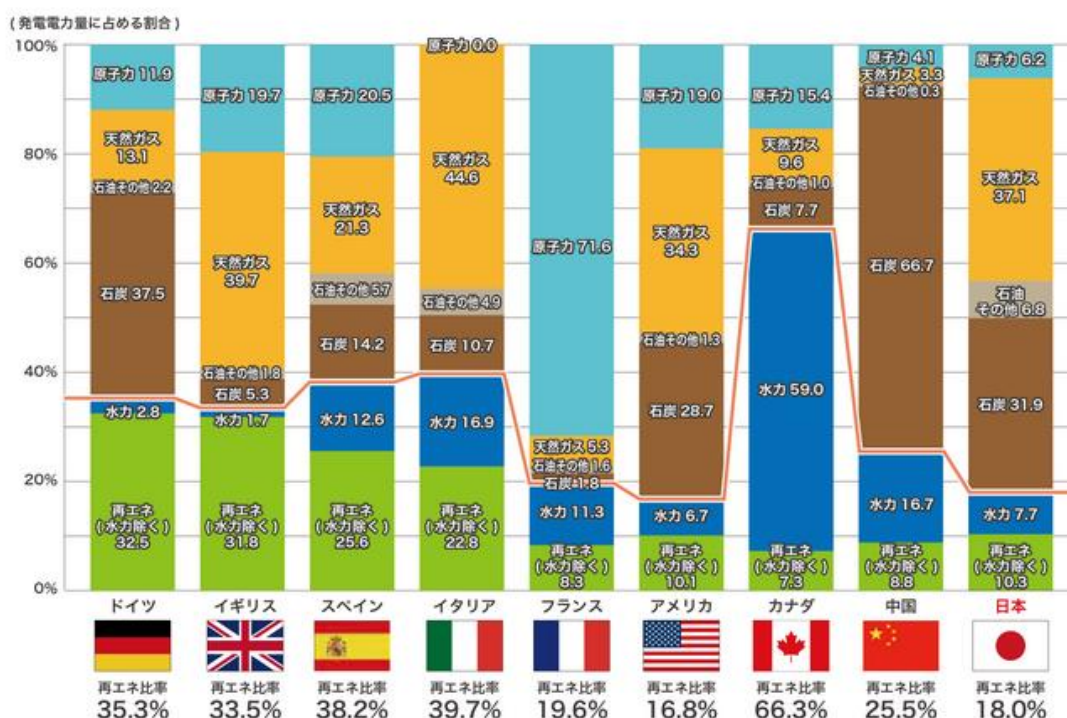


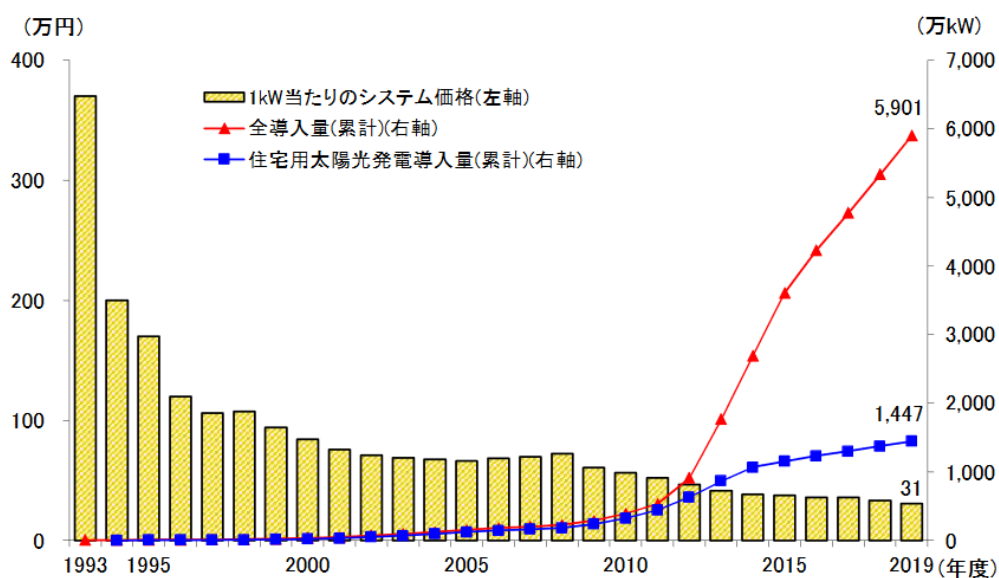
図1-5 主要国の発電電力量に占める再生可能エネルギー比率の比較<sup>[19]</sup>

出典：経済産業省資源エネルギー庁

### 1.3.2 太陽光発電装置の普及

太陽光発電は、p 型半導体と n 型半導体の接合部に光によりエネルギーが与えられると電子が価電子帯から導電帯へ移動する現象を利用して、太陽光エネルギーを電気エネルギーに変換する発電方法である。図 1-6 には、太陽光発電装置(PV 装置)の国内導入量とシステム価格の推移を示している。太陽光発電装置の国内導入量は、2009 年に余剰電力買い取り制度が開始されたことや、補助制度が再度導入されたことに伴い、徐々に増加し始めた。さらに、2012 年に FIT 制度が導入されたことに伴い、急激に増加していった。2019 年度末には、全導入量は累計 5,901 万 kW に達している。また、1 kW 当たりのシステム価格も、太陽光発電が普及するにしたがって低下していき、2019 年では、31 万円/kW 程度になっている<sup>[2]</sup>。

一般社団法人太陽光発電協会(JPEA)は、2020 年に発表した「PV OUTLOOK 2050」において、PV 装置の導入量が 2030 年までに 100 GW(10,000 万 kW)、2050 年までに標準ケースで 200 GW(20,000 万 kW)、最大化ケースで 300 GW(30,000 万 kW)になることを想定しており、今後ますます、PV 装置の導入量は増加していくものと考えられる<sup>[22]</sup>。



(注) システム価格は住宅用(10kW未満)の平均値。

図 1-6 PV 装置の国内導入量とシステム価格の推移<sup>[2]</sup>

出典: 経済産業省資源エネルギー庁

### 1.3.3 PV 装置の大量導入が電力系統へ与える影響と課題

PV 装置などの再生可能エネルギーを利用した発電は分散型電源とも呼ばれる。分散型電源によって発電された電力が現地消費を上回る場合には、発電した電力を既存の電力系統へ流すことが行われる。これは、本来の電力の潮流(従来型発電所から需要家)とは逆になることから、逆潮流と呼ばれている。

一般的には、火力発電などの在来型電源は、その出力を人為的に制御することができ、需要家の電力需要に合わせた発電量となるように制御することが行われる。しかしながら、太陽光発電などの再生可能エネルギー電源は天候に発電量が左右されるため、出力の制御が難しい。それら変動型電源が大量に連系された場合には、様々な課題があることがわかってきた。具体的には、(1)電力需給ギャップの発生、(2)それに伴う周波数変動、(3)配電系統の電圧上昇、(4)再生可能エネルギー電源の単独運転と不要解列、(5)系統事故時の電力系統への影響などが挙げられる<sup>[23]</sup>。これらの課題の内、「(3)配電系統の電圧上昇」に関して、配電系統に PV 装置が大量に接続されると、PV 装置連系点において、電圧上昇が発生することが懸念される。このとき、連系点の電圧が適正値を逸脱する可能性があり、電圧を適正値に維持することは、需要家の電気機器への影響、系統側の機器保護の観点から必要であり、電圧が適正値を超えないように太陽光発電を止めたり、出力を抑制したりするなどの対策が求められている<sup>[23]</sup>。この問題に関して、様々な研究が進められている<sup>[24]-[28]</sup>。例えば、PV 装置の出力に伴う低圧需要家内電圧の上昇を抑えるために、低圧需要家内に静止型無効電力補償装置(SVC: Static Var Compensator)を設置することを想定し、その際の適切な SVC の定格容量やパラメータについて、計算機シミュレーション MATLABSimulink を用いることで明らかにされている<sup>[24]</sup>。また、文献[25]では、PV 装置が発電する際の外的要素である、温度、日射量、発電量が変化した場合の配電系統における電圧の静的応答と過渡的影響が検討されている<sup>[25]</sup>。さらに、配電系統に PV 装置が分散して大量に導入された場合には、負荷時タップ切替変圧器(LRT: Load Ratio control Transformer)と PV 装置群の力率を制御することで電圧上昇を抑える研究がなされている<sup>[26]</sup>。

配電分野では、送電分野とは異なり、線路抵抗が無視できず、その影響が大きく現れる。そのため、長い間配電分野では、線路抵抗に着目した近似的検討が実施されてきた。PV 装置の導入初期においても、線路抵抗の影響のみに囚われ、逆潮流電流により PV 装置連系点電圧が上昇し、適正値を逸脱することが一つの懸念事項として大きく取り上げられてきた。しかしながら、大容量の PV 装置が長距離配電系統の末端に連系されたところでは、電圧上昇だけでは説明できない事象

が観測され始めた。そのため、線路リアクタンス成分を考慮した検討が進められるようになった<sup>[27][28]</sup>。これらの研究では、簡易的に、リアクタンスのみを考慮した場合について検討され、抵抗成分とリアクタンス成分を同時に扱うことが課題であった。そして、2018年には、抵抗成分とリアクタンス成分を含んだ配電線を想定し、PV装置が配電線路末端に連系された場合におけるPV装置連系距離とPV装置連系点電圧の関係に関して、電圧が上昇するだけではなく低下する局面があることが電気回路論的に明らかにされた<sup>[29]</sup>。しかしながら、PV装置から出力可能な最大電流、最大電力、および配電線路に沿った電圧分布に関して、線路インピーダンス、線路長、力率等との具体的な関係性はいまだに明らかになっていないのが現状である。

## 1.4 環境低負荷ガスを利用したガス遮断器

### 1.4.1 SF<sub>6</sub>の規制と代替ガスの候補

前述のように、地球環境に優しい電力システムの構築を目指して、比較的電圧の低い配電システムなどにおいては、PV装置などの再生可能エネルギー利用が推進されている。それとは別に、基幹システムをはじめとした高い電圧の電力システムにおいては、COP3で規制対象ガスに指定されたSF<sub>6</sub>ガスの取り扱いが課題となっている。

主に66kV以上の電力システムにおいては、SF<sub>6</sub>ガスを用いたガス絶縁開閉装置(GIS)やガス遮断器(GCB)などの電力機器が導入されている。GISには、遮断器や断路器、接地装置などが、SF<sub>6</sub>ガスを充填した密閉金属製容器に収納されている<sup>[30]</sup>。SF<sub>6</sub>ガスは、空気の約3倍に相当する高い絶縁耐力および空気の約100倍の消弧能力を有することから、現在でも広く利用されているが、地球温暖化係数(GWP-100)が25,200<sup>[31]</sup>と非常に大きく、1.2節でも述べたように、1997年に開催されたCOP3で採択された京都議定書において、使用を削減すべきガスとして指定されている。電力システムではSF<sub>6</sub>ガスは密閉容器内で使用されているため、外部への漏洩をゼロにできれば、問題は無いが、メンテナンス時等における漏洩は完全にゼロにはできない。したがって、SF<sub>6</sub>ガスに代わる絶縁消弧ガスが求められている。

SF<sub>6</sub>の代替ガスが有すべき特性としては、

- (1)絶縁耐力が高いこと。
- (2)アーク消弧の力が高いこと。
- (3)GWPが低いこと。

- (4)オゾン層破壊能力(ODP)が低いこと。
- (5)毒性がないこと。
- (6)不燃性であること。
- (7)高い熱拡散能力を有すること。
- (8)化学的安定性が高いこと。
- (9)材料適合性があること。
- (10)市場での入手性が良いこと。

が挙げられる<sup>[32]</sup>。代替候補ガスの種類を大別すると、CO<sub>2</sub>やO<sub>2</sub>などの自然系ガスとC<sub>5</sub>F<sub>10</sub>Oなどの人工系ガスがあり、このうち自然系ガスに関しては、N<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>が実用的なガス媒体であるとして挙げられている<sup>[33]</sup>。

現在、SF<sub>6</sub>の代替ガスの最も有力な候補として、純粋CO<sub>2</sub>もしくはCO<sub>2</sub>をベースにした混合ガス(CO<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>/CF<sub>3</sub>I, CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>/He, CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>など)が提案されており、これらに関して様々な研究が行われている<sup>[33]-[40]</sup>。純粋CO<sub>2</sub>を用いたガス遮断器に関しては、東芝が72 kV級環境低負荷型CO<sub>2</sub>ガス遮断器を開発している<sup>[38]</sup>。さらに、Asea Brown Boveri(ABB)も、商用として、72.5 kV級CO<sub>2</sub>ガス遮断器を製造している<sup>[41]</sup>。

電流遮断時におけるガスの絶縁消弧能力は、機器の大きさや形状を決定する上で重要なパラメータであり、これまで、純粋SF<sub>6</sub>ガスやSF<sub>6</sub>混合ガスや空気に関しては、実験的・理論的に誘電的破壊特性の解明が試みられてきた<sup>[42]-[49]</sup>。理論的に求める方法としては、電子エネルギー分布関数をBoltzmann方程式を解くことにより求め、実効電離係数や臨界電界値を求める方法がよく行われている<sup>[49]</sup>。

#### 1.4.2 遮断器における交流電流遮断過程

遮断器の重要な責務の一つは、電力系統に故障が発生したとき、直ちに事故区間を電力系統から除去することである。特に、遮断すべき電流値が大きくなる短絡事故の遮断において、電流零点において最大電圧が発生する場合には、遮断が困難となる<sup>[50][51]</sup>。実際の遮断器では、遮断器の電極間の金属接触が失われると、アーク放電が発生し、これを通じて電流が流れ続ける。ガス遮断器の場合、ガス圧力は通常0.1 MPa以上であり、その内部はおおよそガス温度と電子温度が等しくなる熱平衡状態にあるとみなされ、熱プラズマ状態である。例えば、0.1 MPa, 10,000 Kの高温空気は約3,000 S/mの高い導電性を持つ<sup>[52]</sup>。



図 1-7 に遮断器における交流遮断過程の概念図を示す<sup>[53]</sup>。電流遮断過程では、アーク放電の導電性は、電流がゼロに近づくにつれて、次第に低下していくが、電流零点後の数マイクロ秒から数十マイクロ秒の期間では、電極間に導電性の高いガスが残留している。

電流遮断を達成するためには、電流零点以降、

- (1) 数マイクロ秒以内の熱的破壊領域
- (2) 電流零点から数十マイクロ秒～数ミリ秒の誘電的破壊領域

の二つの領域を乗り越える必要がある。

(1)熱的破壊領域では、電極間に残留した導電性の高い高温ガスに過渡回復電圧 (TRV: Transient Recovery Voltage) が印加されることで、電極間に残留電流と呼ばれる微小な電流が流れることがある。この残留電流によって、電極間には電気的エネルギーが注入される。この電気的入力エネルギーよりもアークの損失が大きい場合には、残留電流は次第にゼロになり、この期間の消弧に成功したことになる。しかしながら、電気的入力エネルギーがアークの損失よりも大きい場合には、残留電流は増加し続け、再びアークが形成され、遮断失敗に至る<sup>[51]</sup>。

次に、(2)の誘電的破壊領域は、熱的破壊領域を乗り越えた後の期間である。この期間では、高温ガスの導電性は十分に低下しており、TRV による残留電流は流れないため、熱的破壊は生じな

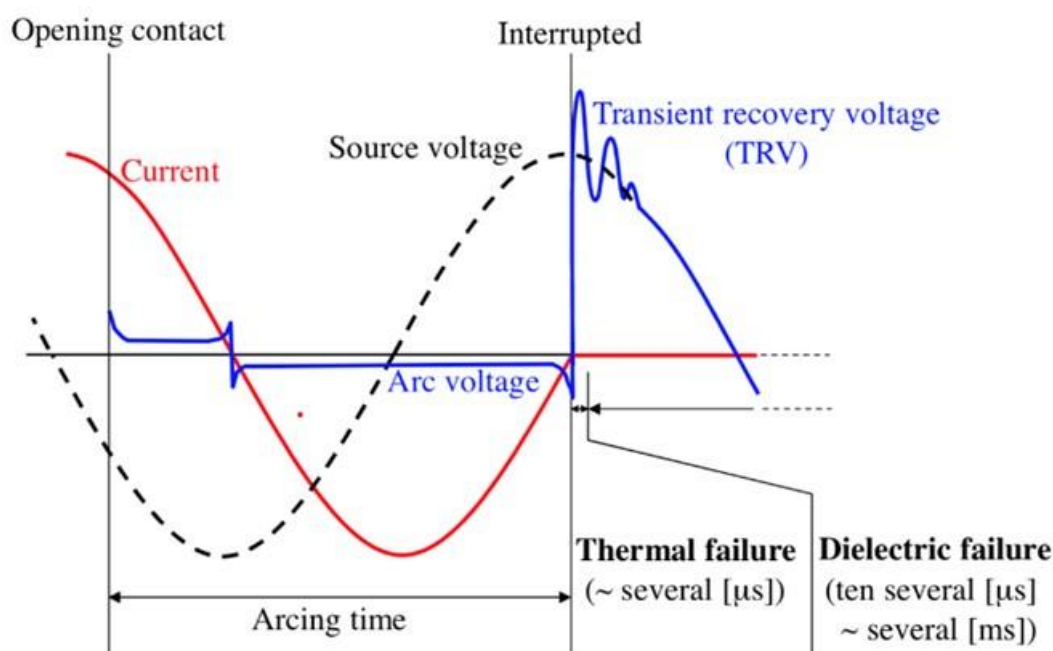


図 1-7 遮断器における交流電流遮断過程<sup>[53]</sup>

出典:名古屋大学 横水研究室

い。しかしながら、電極間には、約 3,000 K 以下の高温ガスが残留しており、その高温ガスの絶縁耐力よりも大きな TRV が印加されると、電極間で絶縁破壊が発生し、再びアークが再形成され、電流遮断に失敗する<sup>[51]</sup>。これら両方の領域を乗り越えて、電流遮断が完了する。

### 1.4.3 ガス遮断器におけるノズル材料の溶発現象

図 1-8 には、ガス開閉装置内の遮断器部での電流遮断過程におけるアーク放電の形成・消滅の様相を示している<sup>[54]</sup>。ガス遮断器の消弧室は、可動電極と固定電極で構成され、電極は PTFE (Polytetrafluoroethylene,  $-C_2F_4-$ ) からなるノズルで囲まれている。電流遮断時に発生するアーク放電は、非常に高温であり、電流遮断時には、このノズルが溶発する。熱パuffa 式のガス遮断器では、この電流遮断時ノズル材料から発生するアブレーションガスのエネルギーをパuffa 室へ逆流させることによって、高い吹き付け圧力を得られることから、ノズル溶発ガスによる加圧効果、ノズル溶発量に関する検討がなされている<sup>[54]~[58]</sup>。このような状況において、ノズル材料の溶発蒸気が絶縁・消弧ガスに混入することは、遮断性能に影響を与えられ、 $SF_6$  ガスに対しては、ノズル材料である PTFE/BN 溶発蒸気が混入した場合の誘電的破壊特性に関して議論された研究がある<sup>[59]</sup>。しかしながら、 $SF_6$  代替消弧ガスの誘電的破壊特性に対しては、十分に検討されていないのが現状である。

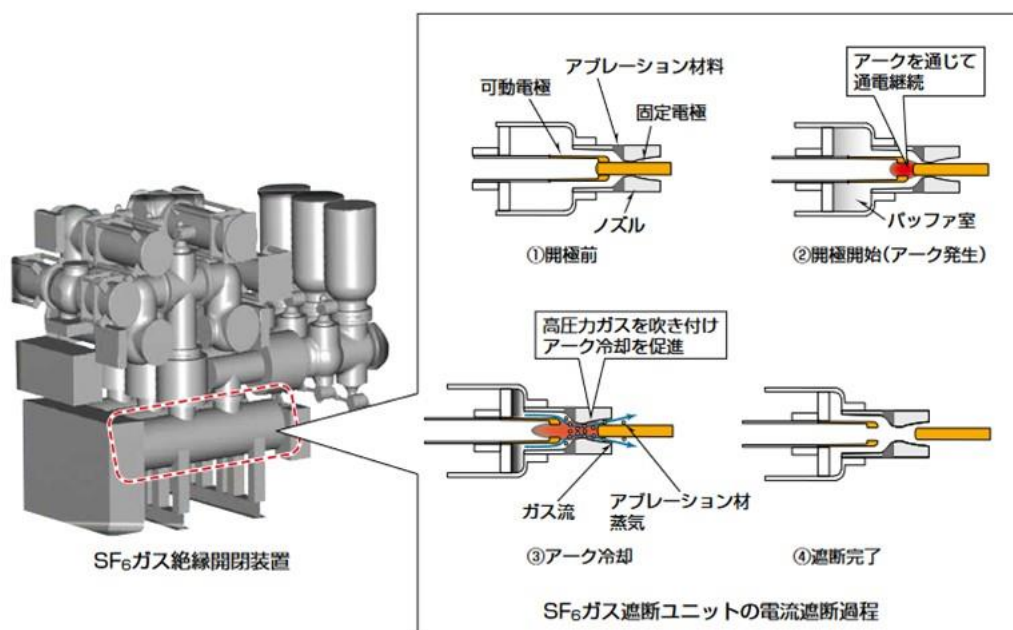


図 1-8 ガス開閉装置内の遮断器部における電流遮断過程<sup>[54]</sup>

出典：三菱電機技報 Vol.93 No.6(2019)

## 1.5 本研究の目的と概要

地球環境に優しい電力システムの構築のために、温室効果ガスの排出量を低減することが強く求められている。本研究は、電力システムにおける温室効果ガスの排出低減に関係する二つのテーマに取り組んだものである。一つは、発電時に温室効果ガスを発生しない発電方法の一つである太陽光発電装置(PV装置)に焦点を当てて、大容量PV装置が配電システムに接続された場合に関する課題を解決することを目的としている。もう一つは、電力用ガス遮断器やガス絶縁開閉装置などに用いられており、地球温暖化への影響がCO<sub>2</sub>の25,200倍であるSF<sub>6</sub>ガスの利用削減のために、SF<sub>6</sub>ガスの代替ガス探索に関して、特に絶縁特性に関する課題を解決することを目的としている。

具体的な課題としては、

- (1) 配電用変電所の直近に電氣的負荷が集中して存在し、配電線路の末端に大容量PV装置が連系され、線路途中に負荷がない長距離配電システムを対象として、PV装置連系点電圧の線路長依存性等が明らかにされている。しかしながら、PV装置から出力可能な最大電流、最大電力、および配電線路に沿った電圧分布に関して、線路インピーダンス、線路長、力率等との具体的な関係性およびそれらの解析技術は確立されていない。これらを解明することにより、太陽光発電装置の発電電力を有効利用する方策が明らかになる。
- (2) SF<sub>6</sub>ガスは、その高い地球温暖化係数(CO<sub>2</sub>の25,200倍)のために、代替ガスの探求が進められており、CO<sub>2</sub>ガスを主ガスに用いた混合ガスが代替ガスの候補に取り上げられている。混合するガスとしては、自然系ガスではO<sub>2</sub>が、人工系ガスではCO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>Oが検討されている。これらの代替ガスの常温における絶縁特性は解明されて来ているが、電力用遮断器内で発生するアーク放電によって高温状態になった代替ガスの絶縁特性は明らかになっていない。さらに、電流遮断時にガス遮断器のノズル材料が溶発し、絶縁消弧ガスへ混入すると考えられる。現状ではノズル材料としてPTFEが用いられているので、代替ガスにPTFE溶発蒸気が混入したときの絶縁特性を解明することで、このときの遮断性能を明らかにすることができる。

本論文は、上述した二つの課題の解明に取り組んだ成果をまとめたものである。

本論文は、全7章で構成されている。まず、第1章では、本研究の社会的背景や課題をまとめるとともに、本研究の目的を明確にした。

第 2 章では、高圧配電系統末端の電圧の逆潮流電流依存性を、電圧・電流ベクトル図上で定性的に表示できることを明らかにした。ここでは、力率 1 運転時および進み力率運転時の両方を取り扱っている。連系点電圧ベクトルの軌跡を分析することにより、PV 装置逆潮流電流増加時の PV 装置連系点電圧の上昇・低下のメカニズムを電気回路論的に明らかにした。さらに PV 連系点電圧の逆潮流電流依存性に関する表式を示すことができた。

第 3 章では、各種有効電力(大容量 PV 装置からの出力電力、配電用変電所(配変)に流入する電力および線路損失)が第 2 章で導出したベクトル図上の三角形の面積に比例すること明らかにし、PV 出力電流および線路距離の関数として、これらの電力を定式化した。これにより、PV 装置からの出力電力が最大となる条件(PV に許容される最大電力)、および配電用変電所に流入する電力が最大となる条件を定性的かつ定量的に明らかにできた。さらに、PV 装置からの出力電力を増やしていった場合、その電力が小さい範囲では、その電力の増加に伴って配変に流入する電力も増加するが、ある程度大きくなりすぎると、かえって配変に流入する電力が低下する局面があることを見出した。

第 4 章では高圧配電系統末端に大容量 PV 装置が接続された場合における線路電圧の分布を、ベクトル図より求め、PV の出力電流および線路距離の関数として定式化した。それにより、線路末端だけでなく線路途中における電圧の上昇・低下のメカニズムを明らかにした。これにより、線路途中に導入される電圧制御装置の制御アルゴリズムの変更に有用な知見が得られた。

第 2 章から第 4 章までの成果は、大容量 PV 装置が連系することを想定した場合の配電計画に大きく貢献し、太陽光エネルギーの有効利用に繋がる。

第 5 章では、重要な系統保護装置であるガス遮断器に焦点を当てた。環境に低負荷な絶縁消弧ガスとして自然系ガスの CO<sub>2</sub> ガスを想定し、ノズル材料として PTFE を想定した場合の誘電的破壊特性を求めた。この場合、PTFE はアーク放電によって溶発し、そこから発生する原子・イオン(PTFE 溶発蒸気)が CO<sub>2</sub> ガスに混入する。はじめに、基礎データとして、様々な PTFE 溶発蒸気混入率における粒子組成および電子衝突断面積を用い、衝突電離係数および電子付着係数を求めた。この衝突電離係数および電子付着係数から、換算臨界電界を求め、温度 300 K-4,000 K の範囲での温度依存性を明らかにした。さらに、どの粒子のどの反応が、臨界電界に最も影響しているのかを検討した。

第 6 章では、人工系ガスの C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O に着目し、CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスを取り上げる。この混合ガスと PTFE(-C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>-)溶発蒸気が混入した CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合ガスとが同じ原子から構成されていることに

着目し、これらのガスが高温により一度解離した後の特性に関して、等価になる条件の導出に成功した。ガス遮断器における PTFE ノズルの溶発現象を利用することで、液化リスクの問題から使用が制限されている C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O の混入量が少量もしくはゼロでも C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混入時と同等の遮断性能を得ることができる可能性を示せた。

第 5 章および第 6 章までの成果は、ガス遮断器における環境低負荷ガスの選定に関して、ガス遮断器の能力を推定する手段として活用でき、SF<sub>6</sub> 代替ガス遮断器の性能向上や普及に大きく貢献する。

最後に、第 7 章で本論文の総論を記述し、本研究で得られた主要な知見をまとめた。

## 第 1 章の参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁,「令和 3 年度エネルギーに関する年次報告, 第二部第一章国内エネルギー動向」, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2022/pdf/2\\_1.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2022/pdf/2_1.pdf) (閲覧日:2022 年 12 月 12 日)
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁,「令和 2 年度エネルギーに関する年次報告, 第二部第一章国内エネルギー動向」, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/pdf/2\\_1.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/pdf/2_1.pdf) (閲覧日:2022 年 12 月 12 日)
- [3] 経済産業省資源エネルギー庁,「平成 29 年度エネルギーに関する年次報告, 第一部第一章, 明治維新後のエネルギーをめぐる我が国の歴史」, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018pdf/whitepaper2018pdf\\_1\\_1.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018pdf/whitepaper2018pdf_1_1.pdf)(閲覧日:2022 年 10 月 18 日)
- [4] 経済産業省資源エネルギー庁,「平成 29 年度エネルギーに関する年次報告, 第一部第三章, エネルギーをめぐる内外の情勢と課題変化」, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018pdf/whitepaper2018pdf\\_1\\_3.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018pdf/whitepaper2018pdf_1_3.pdf)(閲覧日:2022 年 10 月 18 日)
- [5] 経済産業省資源エネルギー庁,「【日本のエネルギー、150 年の歴史④】2 度のオイルショックを経て、エネルギー政策の見直しが進む」, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/history4shouwa2.html>(閲覧日:2022 年 10 月 18 日)
- [6] IPCC , FAR Climate Change: Scientific Assessment of Climate Change , <https://www.ipcc.ch/report/ar1/wg1/>(閲覧日:2022 年 10 月 18 日)
- [7] 環境省,「IPCC 評価報告書 第 1 次～第 3 次評価報告書概要, 1990 年:第 1 次評価

- 報告書 (FAR) 概要」, <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ipccinfo/IPCCgaiyo/report/IPCCChyoukahoukokusho1.html> (閲覧日:2022年10月18日)
- [8] 経済産業省資源エネルギー庁,「平成22年度エネルギーに関する年次報告,第一部第一章,東日本大震災によるエネルギーをめぐる課題と対応」, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2011pdf/whitepaper2011pdf\\_1.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2011pdf/whitepaper2011pdf_1.pdf) (閲覧日:2022年10月18日)
- [9] 経済産業省,「第6次エネルギー基本計画」, <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf> (閲覧日:2022年10月18日)
- [10] 経済産業省資源エネルギー庁,「グラフで見る世界のエネルギーと「3E+S」安定供給①～各国の自給率のいま」, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/3es\\_graph01.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/3es_graph01.html) (閲覧日:2022年10月18日)
- [11] 全国地球温暖化防止活動推進センター(JCCCA),「気候変動枠組条約」, <https://www.jccca.org/global-warming/trend-world/unfccc> (閲覧日:2022年10月18日)
- [12] 国立研究開発法人国立環境研究所(NIES)「COP(コップ)とは?」, 2002年度 21巻1号, <https://www.nies.go.jp/kanko/news/21/21-1/21-1-05.html> (閲覧日:2022年10月18日)
- [13] WWF ジャパン,「京都議定書とは?合意内容とその後について」 <https://www.wwf.or.jp/activities/basicinfo/3536.html> (閲覧日:2022年10月18日)
- [14] 全国地球温暖化防止活動推進センター(JCCCA),「京都議定書の概要」, <https://www.jccca.org/cop/kyo01> (閲覧日:2022年10月18日)
- [15] 経済産業省資源エネルギー庁,「令和2年度エネルギーに関する年次報告,第二部第一章 2050年カーボンニュートラル」, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/pdf/1\\_2.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/pdf/1_2.pdf) (閲覧日:2022年10月18日)
- [16] 経済産業省資源エネルギー庁,「「カーボンニュートラル」って何ですか?(前編)～いつ、誰が実現するの?」, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon\\_neutral\\_01.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon_neutral_01.html) (閲覧日:2022年10月18日)
- [17] 経済産業省資源エネルギー庁,「2050年カーボンニュートラルを目指す 日本の新たな「エネルギー基本計画」」, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energykionkeikaku\\_2022.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energykionkeikaku_2022.html) (閲覧日:2022年10月18日)

- [18] J-POWER ホームページ, 「再生可能エネルギー早わかり」, [https://www.jpowers.co.jp/renewable\\_energy/](https://www.jpowers.co.jp/renewable_energy/)(閲覧日:2022年10月18日)
- [19] 経済産業省資源エネルギー庁, 「日本のエネルギー2020 年度版「エネルギーを知る 10の質問」」, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2020/007/>(閲覧日:2022年10月18日)
- [20] 経済産業省, 「資料1-1「第6次エネルギー基本計画の概要」」, <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-2.pdf> (閲覧日:2022年10月18日)
- [21] 経済産業省資源エネルギー庁, 「再エネを日本の主力エネルギーに! 「FIP 制度」が2022年4月スタート」, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/fip.html> (閲覧日:2022年10月18日)
- [22] 一般社団法人太陽光発電協会, 「JAEA ビジョン・PVOUTLOOK2050 感染症の危機を乗り越え, あたらしい社会へ「太陽光発電の主力電源化への道筋」」, [https://www.jpaea.gr.jp/wp-content/themes/jpea/pdf/pvoutlook2050\\_2020.pdf](https://www.jpaea.gr.jp/wp-content/themes/jpea/pdf/pvoutlook2050_2020.pdf) (閲覧日:2022年10月18日)
- [23] NEDO 再生可能エネルギー技術白書第2版, 「第9章 系統サポート技術」  
<https://www.nedo.go.jp/content/100544824.pdf>(閲覧日:2022年10月18日)
- [24] 飯岡大輔, 榊原邦晃, 横水康伸, 松村年郎, 出原 範久, :「太陽光発電装置が集中導入された配電系統の電圧上昇と SVC による抑制」, 電気学会論文誌 B, Vol.126, No.2, pp.153-158(2006), DOI:10.1541/ieejpes.126.153
- [25] Y. Xue, M. Manjrekar, C. Lin, M.Tamayo, and J.N. Jiang: “Voltage stability and Sensitivity Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems”, Proc. IEEE Conf. on Power and Energy Society General Meeting (2011)
- [26] 川崎章司・金本憲明・田岡久雄・松木純也・林 泰弘: 「太陽光発電システム群の力率制御と LRT による協調型電圧制御法」, 電気学会論文誌 B, Vol.132, No.4, pp.309-316 (2012)
- [27] 石川幸一郎, 谷口 治人, 鈴木 宏和, 太田 豊, 水野陽二郎: 「太陽光発電が大量に連系された系統の電圧に関する基礎特性」, 電気学会論文誌 B, Vol.134, No.1, pp. 2-8, DOI:10.1541/ieejpes.134.2, (2014)
- [28] 石川幸一郎, 谷口 治人, 鈴木 宏和, 太田 豊, 水野陽二郎: 「誘導機負荷の動特性を

- 考慮した太陽光発電連系系統の電圧安定性に関する基礎的検討」,電気学会論文誌 B, Vol.134, No.7, pp.568-578, DOI: 10.1541/ieejpes.134.568, (2014)
- [29] 松村年郎, 雪田和人, 後藤泰之, 塚本真澄, 立脇建人, 横水康信:「大容量太陽光発電装置の高圧配電系統末端への導入に伴う配電系統の電圧上昇・低下メカニズムに関する回路論的考察」, 電気学会論文誌 B, Vol.138, No.1, pp.23-29, DOI: 10.1541/ieejpes.138.23, (2018)
- [30] 日新電機株式会社ホームページ, 「製品サービス, ガス絶縁開閉装置」  
<https://nissin.jp/product/electric/gis/index.html>(閲覧日:2022年10月18日)
- [31] IPCC, “Sixth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change (AR6)”, chapter 7 The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity - Supplementary Material, 7SM-29, (2021)
- [32] 規格改訂に向けた交流遮断器の仕様と開閉責務調査専門委員会:「交流遮断器規格 JEC-2300 改正の背景・根拠」, 電気学会技術報告, 第 1474 号, (2020)
- [33] T. UCHII, T. YASUOKA, Y. HIRONO, N. KATO, T. SAIDA: “Present status and future prospects of SF<sub>6</sub> alternative technologies for a high-voltage switchgear”, Proc. of CIGRE SC A3/B3 Joint Colloquium at Nagoya, No. 222(2015)
- [34] M. Rong, H. Sun, F. Yand, Y. Wu, Z. Chen, X. Wang, and M. Wu: “Influence of O<sub>2</sub> on the dielectric properties of CO<sub>2</sub> at the elevated temperatures”, Phys. Plasmas, Vol.12, 112117 (2014)
- [35] X. Xiaoling, J. Juntao, and X. Dengming: “Breakdown Electric Field of Hot 30% CF<sub>3</sub>I/CO<sub>2</sub> Mixtures at Temperature of 300–3500 K During Arc Extinction Process”, Plasma Sci. & Technol., Vol.18, No.11 (2016-11)
- [36] L. Zhong, A. Yang, X. Wang, D. Liu, Y. Wu, and M. Rong: “Dielectric breakdown properties of hot SF<sub>6</sub> -CO<sub>2</sub> mixtures at temperatures of 300–3500 K and pressures of 0.01–1.0 MPa”, Phys. Plasmas, Vol.21, 053506 (2014)
- [37] Z. Chen, C. Niu, H. Zhang, H. Sun, Y. Wu, F. Yangm, M. Rong, and Z. Xu: “Investigation on the reduced critical breakdown field of hot CO<sub>2</sub> gas and CO<sub>2</sub> based mixtures”, 2015 3rd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST) Busan, Korea, (Oct. 25–28, 2015)"



- [38] T. Uchii, Y. Hoshina, H. Kawano, K. Suzuki, T. Nakamoto, and M. Toyoda: “Fundamental Research on SF<sub>6</sub> -free Gas Insulated Swithgear Adopting CO<sub>2</sub> Gas and Its Mixtures”, Proc. of International Symposium on Eco Topia Science 2007, ISETS07 (2007)
- [39] Y. Yokomizu, Y. Hayashi, T. Matsumura, A. Majima, T. Uchii, and K. Suzuki: “High-Temperature Properties of CO<sub>2</sub> Mixed with N<sub>2</sub>”, IEEJ Trans. PE, Vol.133, No.11, pp.867–874 (2013)
- [40] H. Sun, M. Rong, Y. Wu, Z. Chen, F. Yang, A.B. Murphy, and H. Zhang: “Investigation on critical breakdown electric field of hot carbon dioxide for gas circuit breaker applications”, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.48, 055201, IOP Publishing, pp.16 (2015)
- [41] Publication 1HSM 9543 21-06en, High voltage CO<sub>2</sub> circuit breaker type LTA, Edition 1, 2014-02
- [42] Yan JD, Fang MTC, Liu QS: “Dielectric breakdown of residual SF<sub>6</sub> plasma at 3000 K under diatomic equilibrium”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, Issue 1, pp.114–119, (1997)
- [43] Cliteur GJ, Hayashi Y, Haginomori E, Suzuki K: “Calculation of the uniform breakdown field strength of SF<sub>6</sub> gas”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, Issue 6, pp.843-849, (1998)
- [44] Yousfi M, Jouan R, Kanzari Z: “Breakdown electric field calculations of hot SF<sub>6</sub> for high voltage circuit breaker applications”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, Issue 6, pp.1192-1200, (2005)
- [45] Yousfi M, Jouan R, Kanzari Z: “Electron-molecule collision cross sections needed for breakdown electric field calculations of hot dissociated SF<sub>6</sub>”, Journal of Physics: Conference Series 2008; 115:012012, (2008)
- [46] Zhao H, Li X, Jia S, Murphy AB: “Dielectric breakdown properties of SF<sub>6</sub> -N<sub>2</sub> mixtures at 0.01–1.6 MPa and 300–3000 K”, Journal of Applied Physics 2013; 113:143301. <https://doi.org/10.1063/1.4798596>.", (2013)
- [47] Zhong L, Yang A, Wang X, Liu D, Wu Y, Rong M. “Dielectric breakdown properties of hot SF<sub>6</sub> -CO<sub>2</sub> mixtures at temperatures of 300–3500 K and pressures of 0.01–1.0 MPa”, Physics of Plasmas 2014; 21:053506", (2014)

- [48] Yasunobu Yokomizu, Keisuke Murakita, Yuki Kojima, Toshiro Matsumura, Motohiro Sato, Katsuhiko Horinouchi: “Rate Coefficient and Collision Frequency for Electron Collision Process in Hot SF<sub>6</sub> Gas under Electric Field: Electrical Breakdown Property at 300–3000 K”, IEEJ Trans, Vol. 14, Issue 4, pp.506-519, DOI:10.1002/tee.22834(2019)
- [49] 田中 康規, 作田 忠裕, 渋谷 正豊, 「ガス温度 300–3500 K における空気の実効電離係数と臨界電界の数値解析的検討」, 電気学会論文誌 B, Vol.124, No.1, pp.162-168, (2004)
- [50] 公益社団法人日本電気技術者協会, <https://jeea.or.jp/course/contents/01136/> (閲覧日:2022年10月18日)
- [51] 横水康伸, 「ガス吹付けによる大電流のアーク遮断に関する基礎研究」, 名古屋大学図書館, 1086590, <https://nagoya.repo.nii.ac.jp/record/4856/files/ko2389.pdf>
- [52] 作田忠裕, 鬼頭幸生, 宮地巖, 「銅蒸気が混入した高温空気の導電率, 熱伝導率およびエンタルピー」電気学会論文誌 A, Vol.101-A, No.4, pp. 241-248(1981)
- [53] 名古屋大学 横水研究室, <https://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/matumuralab/research-content/research-a.html>(閲覧日:2022年10月18日)
- [54] 佐藤基宗, 川名隆志, 中村泰規, 「新アブレーション材料を適用したアーク冷却技術による SF<sub>6</sub> ガス遮断ユニットの性能向上」, 三菱電機技報, Vol.93, No.6(2019)
- [55] 大沢直樹, 吉岡芳夫, 「熱パuffァ式 GCB におけるガス吹付け特性とガス通路構造との関係」, 電気学会論文誌 B, Vol. 123, No.10, pp.1208-1214(2003)
- [56] 佐藤基宗, 横水康伸, 堀之内克彦, 中村泰規, 芳友雄治, 清水芳則, 「SF<sub>6</sub> ガス遮断器のアーク遮断過程におけるパuffァ室ガス圧力上昇の計算手法——ノズルアブレーション蒸気による加圧効果——」, 電気学会論文誌 B, Vol.140, No.4, pp.331-342(2020)
- [57] 大沢直樹, 吉岡芳夫, 「ノズルアブレーションを考慮した単一分子モデルによるガス遮断器の吹付け圧力の解析」, 電気学会論文誌 B, Vol.121, No.1, pp.88-94(2001)
- [58] 佐藤基宗, 堀之内克彦, 檜座秀一, 中村泰規, 清水芳則, 横水康伸, 「SF<sub>6</sub> アークに暴露される PTFE ノズルのアブレーション質量予測式の提案」, 電気学会論文誌 B, Vol.139, No.7, pp.478-486(2019)
- [59] Tasuya Ishii, Masanao Terada, Yasunobu Yokomizu, Yuki Kojima, Mami Kuroda, Hajime Urai, “Critical Electric-Field Strength of High-Temperature SF<sub>6</sub> Mixture Gas with Ablated

PTFE/BN Vapor at Temperatures of 300–4000 K”, 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), DOI; 10.1109/ICEPE-ST.2019.8928790 (2019)



## 第2章 高圧配電システムの末端に大容量 PV 装置が接続された場合における PV 装置連系点電圧の逆潮流電流依存性

### 2.1 はじめに

第1章で述べたように、発電時に温室効果ガスを排出しない発電方式である PV 装置が大量導入されたことで従来型電力システムでは想定していない課題が現れてきた。特に、長距離高圧配電システムの末端に大容量 PV 装置が接続された場合において、PV 装置連系点電圧が法定電圧を逸脱する事象が発生し始めた。それに対して、配電線路の抵抗成分とリアクタンス成分を考慮した電気回路論的検討により、配電用変電所から PV 装置連系点までの線路長が PV 装置連系点電圧に及ぼす影響が明らかにされた<sup>[1]</sup>。

本章では、長距離高圧配電システムの末端に大容量 PV 装置が接続された場合において、線路長を一定とした場合に PV 装置からの逆潮流電流が PV 装置連系点電圧に及ぼす影響をベクトル図を用いて検討した。

### 2.2 PV 装置が力率 1 で運転している場合

#### 2.2.1 想定した配電システムモデルとベクトル軌跡

図 2-1 に本研究で想定した配電システムの単相等価回路を示す。同図において、配電用変電所の送り出し電圧(配変送出電圧)を  $V_s = 6,600 \text{ V}$  一定とし、配電システムの末端のみに大容量 PV 装置が接続されており、PV 装置連系点での電圧(PV 装置連系点電圧)を  $V_r$ 、PV 装置からの出力電流すなわち逆潮流電流を  $I$ 、配電線路の線路インピーダンスを  $R+jX$  と表記することとする。ただし、配電用変電所から PV 装置連系点までの線路長を  $D = \text{一定}$ (単位長さあたりの線路インピーダンス

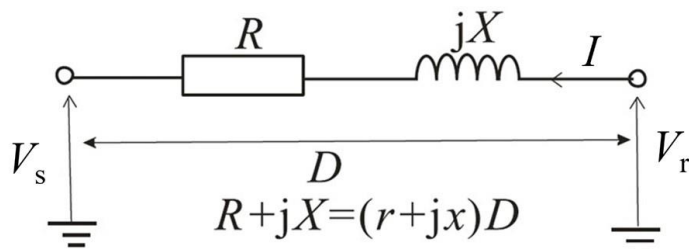


図 2-1 本研究で想定した配電システムの単相等価回路

を  $r+jx$  として,  $R+jX = (r+jx)D = \text{一定}$  としている。同図より, 配変送出電圧ベクトル  $V_s$  を基準にとると, PV 装置連系点電圧ベクトル  $V_r$  と逆潮流電流ベクトル  $I$  との関係は図 2-2 のように表される。この時,  $\psi$  は線路インピーダンスの位相角であり,  $\tan \psi = X/R$  である。また, 本検討において, PV 装

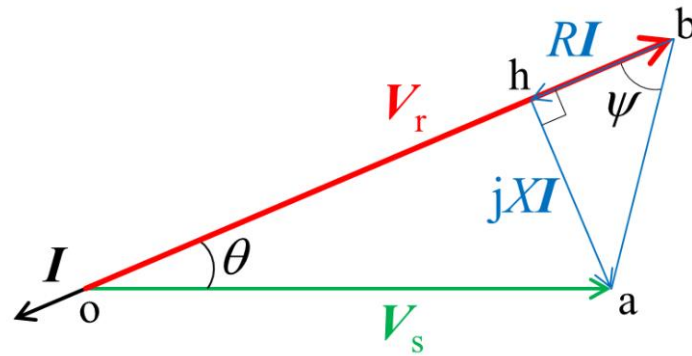


図 2-2 PV 装置連系点電圧  $V_r$ , 配変送出電圧  $V_s$  および逆潮流電流  $I$  のベクトル図

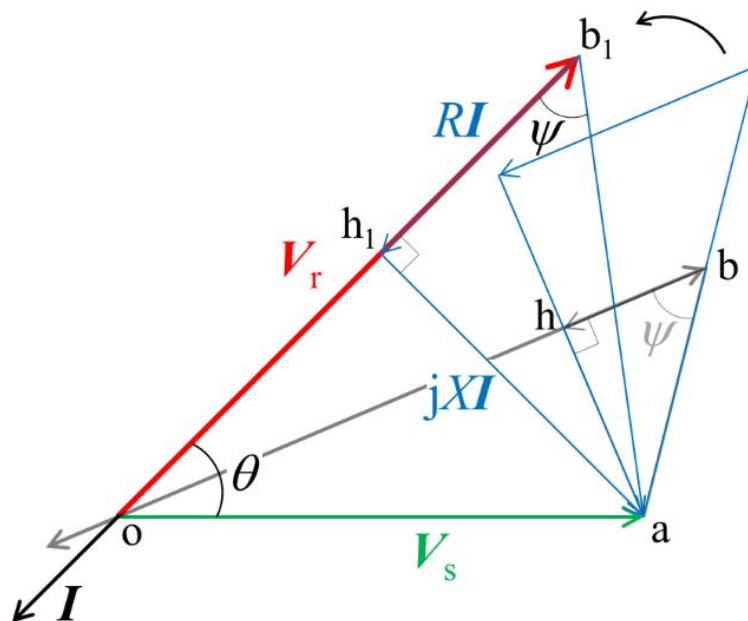


図 2-3 逆潮流電流増加時のベクトル図

置は力率 1 で運転している。すなわち、PV 装置連系点電圧ベクトルと逆潮流電流ベクトルの位相角は 0 である。なお、負荷は配電用変電所近辺に集中連系されており、線路途中には負荷がない場合を想定している。その場合、負荷には配変送出電圧が直接印加され、負荷の有無によって、配変送出電圧がほとんど変わらないと言え、電気回路論的検討には負荷の存在は影響されない。単相等価回路には負荷の存在を記述していない。

図 2-2 において、 $V_s$  に対する  $V_r$  の電圧上昇分は  $RI$  と  $XI$  からなる三角形  $abh$  (以下、 $\Delta abh$  と記述) で示されている。 $R+jX =$  一定としているので、逆潮流電流を増加させた場合、 $\Delta abh$  は相対的に大きくなる。このとき、力率 1 の関係を満たすために、 $\Delta abh$  は点  $a$  を中心に反時計方向へ回転し、図 2-3 に示す  $\Delta ab_1h_1$  の様に変化する。結果として、配変送出電圧ベクトルと PV 連系点電圧ベクトルとの位相角  $\theta$  は大きくなり、PV 連系点電圧ベクトルの先端は、点  $b$  から点  $b_1$  へ移動する。

図 2-4 には、図 2-2 のベクトル図( $V_r$  の先端が点  $b$ )と、力率 1 運転で PV 連系点電圧ベクトルと配変送出電圧ベクトルとの位相角が直角となるまで逆潮流電流を増加させた場合のベクトル図とを同時に描いている。同図において、線分  $\overline{ob}$  と  $\overline{ad}$  の交点を点  $u$  とし、線分  $\overline{bd}$  を点線で示している。また、 $\Delta abh$  および  $\Delta ado$  は逆潮流電流による電圧上昇分を表しており、これらの三角形は  $R$  と  $X$  が一定であれば、 $I$  のみに依存し、相似関係である。したがって、 $\angle abh$  と  $\angle ado$  の大きさは常に  $\psi$

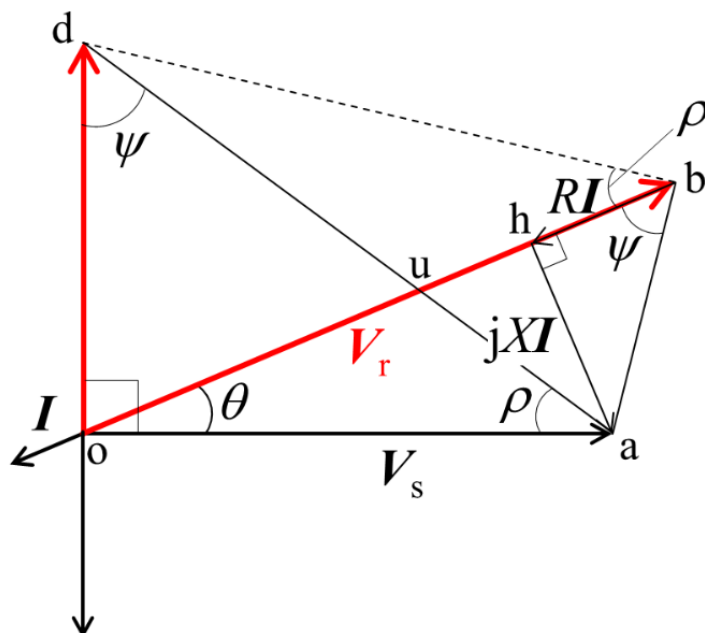


図 2-4 逆潮流電流ベクトルと PV 連系点電圧ベクトルの位相差が 90 度となるベクトル図

であるため、

$$\angle abh = \angle ado = \psi \quad (2-1)$$

となる。次に、 $\triangle abu$ と $\triangle odu$ を考えると、 $\angle aub$ と $\angle oud$ は対頂角であるため等しい。式(2-1)より、 $\angle abh$ と $\angle ado$ も等しいため、 $\triangle abu \sim \triangle odu$ であることがわかる。この関係から、

$\overline{ou} : \overline{ua} = \overline{du} : \overline{ub}$ であることも分かる。また、 $\angle auo$ と $\angle bud$ は対頂角であるため互いに等しい、つまり、 $\triangle auo \sim \triangle bud$ である。この時、 $\angle oad$ を $\rho$ と置くと、

$$\angle oad = \angle obd = \rho \quad (2-2)$$

となる。ここで、 $\triangle oad$ は直角三角形であるので、

$$\angle ado + \angle oad = \psi + \rho = \pi / 2 \quad (2-3)$$

である。以上より、以下の関係が成り立つ。

$$\angle abd = \psi + \rho = \pi / 2 \quad (2-4)$$

式(2-4)は、力率1一定運転時の場合、 $I$ の大きさに関わらず常に成り立つ。したがって、 $I$ の増加に伴って、 $V_r$ の先端は、図2-5に示すように、線分 $\overline{ad}$ を直径とする半円上を移動する。

## 2.2.2 PV装置連系点電圧の表式と許容最大逆潮流電流

図2-5において、PV装置連系点電圧 $V_r$ の大きさは次式で与えられる。

$$V_r(I) = RI + \sqrt{V_s^2 - (XI)^2} \quad (2-5)$$

式(2-5)が解を持つためには、 $V_s^2 - (XI)^2 \geq 0$ を満たす必要がある。この時、 $I$ の範囲は、各変数が常に正であるので、

$$0 \leq I \leq V_s / X \quad (2-6)$$

である。

また、式(2-6)より、許容される最大電流 $I_{\max}$ は、

$$I_{\max} = V_s / X \quad (2-7)$$

と表わされる。このとき、式(2-5)より、PV装置連系点電圧 $V_r = RI_{\max}$ となり、図2-4における $\overline{od}$ に対応していることがわかる。したがって、配変送出電圧ベクトル $V_s$ とPV連系点電圧ベクトル $V_r$ との位相角 $\theta$ が $\pi/2$ になるときの逆潮流電流が配電線路へ流すことができる最大値となることがわかった。





点 p としている。前述の通り、同図において、赤い太線で示された PV 装置連系点電圧のベクトル軌跡は線分  $\overline{ad}$  を直径とする半円である。この時、 $\angle aod$  は直角なので、線分  $\overline{ad}$  を直径とする円を描いた場合（ベクトル軌跡以外を赤い点線で描画）、この円周上に点 o は存在する。ここで、四角形 apdo（以下、 $\square apdo$  と記載）について考えると、 $\square apdo$  は赤い円に内接する長方形であるため、対角線である線分  $\overline{op}$  は赤い円の直径である。つまり、連系点電圧の大きさが最大となるのは、点 o から最も離れたベクトル軌跡上の点であるため、 $V_r$  の先端がベクトル軌跡上の点 p と重なるとき、PV 装置連系点電圧の最大値  $V_{r-m}$  となることがベクトル図上から分かる。また、このときの  $V_{r-m}$  の大きさは、同図より、次式で与えられる。

$$V_{r-m} = \frac{V_s}{\sin(\psi)} \quad (2-9)$$

このとき、逆潮流電流  $I$  の大きさは、 $V_s = \sqrt{(RI)^2 + (XI)^2} \tan(\psi)$  より、

$$I = \frac{V_s}{\sqrt{R^2 + X^2} \tan(\psi)} \quad (2-10)$$

である。式(2-9)より、PV 装置連系点電圧の最大値は、線路長  $D$  および逆潮流電流  $I$  に関係なく、配電線の線路インピーダンスの位相角  $\psi$  で決まる。

## 2.2.4 上昇・低下メカニズム

図 2-6 から逆潮流電流  $I$  の増加に伴う PV 装置連系点電圧  $V_r$  の上昇・低下のメカニズムは下記のように説明できる。

- PV 装置からの逆潮流電流  $I=0$  の場合には、PV 装置連系点電圧  $V_r$  の先端は点 a であり、配変送出電圧  $V_s$  と等しい。
- 逆潮流電流  $I$  が増加していくと、前述のように  $V_r$  の先端は赤い太線上を移動する。この時、赤い太線は、緑の破線の円弧（点 o を中心、送電端電圧を半径とした円弧）から外側に離れていくことから、PV 装置連系点電圧は配変送出電圧よりも高くなる。
- 逆潮流電流  $I$  がさらに増加すると、PV 装置連系点電圧  $V_r$  はさらに上昇していき、点 p において  $V_r$  の大きさが最大となる。したがって、点 a から点 p の範囲では、PV 装置連系点電圧は上昇する。
- さらに電流が増加し、点 p を超えると、赤い太線は緑の点線に近づいていく、つまり、電圧  $V_r$

は低下し始める。

- 点  $p$  から点  $d$  の範囲では、逆潮流電流の増加に伴って、電圧は低下する。また、PV 連系点電圧ベクトル  $V_r$  の先端が点  $f$  と重なるとき、PV 装置連系点電圧と配変送出電圧の大きさが等しくなる。そのため、点  $f$  から点  $d$  の範囲では、緑の二点鎖線の円より内側を赤いベクトル軌跡が通っているため、配変送出電圧  $V_s$  よりも低下していることがわかる。

一方で、図 2-7 に示しているような、線路インピーダンスの抵抗成分の方がリアクタンス成分より大きい線路 ( $R > X$ ) の場合について考えると、図 2-6 の場合と同様に、逆潮流電流の増加に伴って PV 連系点電圧は増加し、ベクトル軌跡上にある点  $p$  を境に、電圧は低下していく。しかし、常に、赤いベクトル軌跡は緑の一点鎖線の円の外側を通っているため、配変送出電圧より低下することはない。

なお、本章では、PV 装置のパワーコンディショニングシステム(PCS)が電流を制御しているとして、PV 装置連系点電圧と PV 装置からの電力との詳細な関係に関しては第 3 章で検討している。

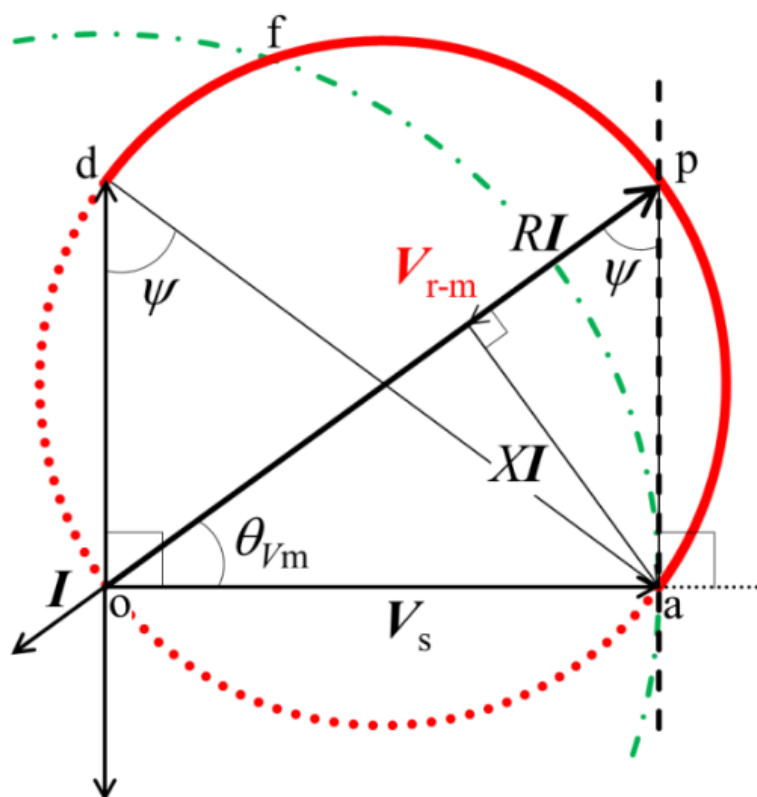


図 2-6 逆潮流電流が増加した場合の  $V_r$  ベクトル軌跡上で PV 装置連系点電圧  $V_r$  が最大となる場合のベクトル図

## 2.2.5 逆潮流電流依存性に関する定量的検討

本項では、PV 装置連系点電圧  $V_r$  の逆潮流電流  $I$  依存性を、線路インピーダンスが  $0.3+j0.4 \Omega/\text{km}$  および線路長が  $D=25 \text{ km}$  である場合を一例にとって定量的に検討する。図 2-8 の黒の太い実線は、PV 装置連系点電圧  $V_r$  の線電流  $I_L (= I/\sqrt{3})$  依存性を示している。同図において、配変送出電圧  $V_s = 6.6 \text{ kV}$  と PV 装置の出力電力  $P_r (= V_r I = \sqrt{3} V_r I_L)$  を、それぞれ緑の一点鎖線および黒の細い実線で描いている。なお、PV 装置は全体で  $P_r$  となるように三相平衡状態で接続

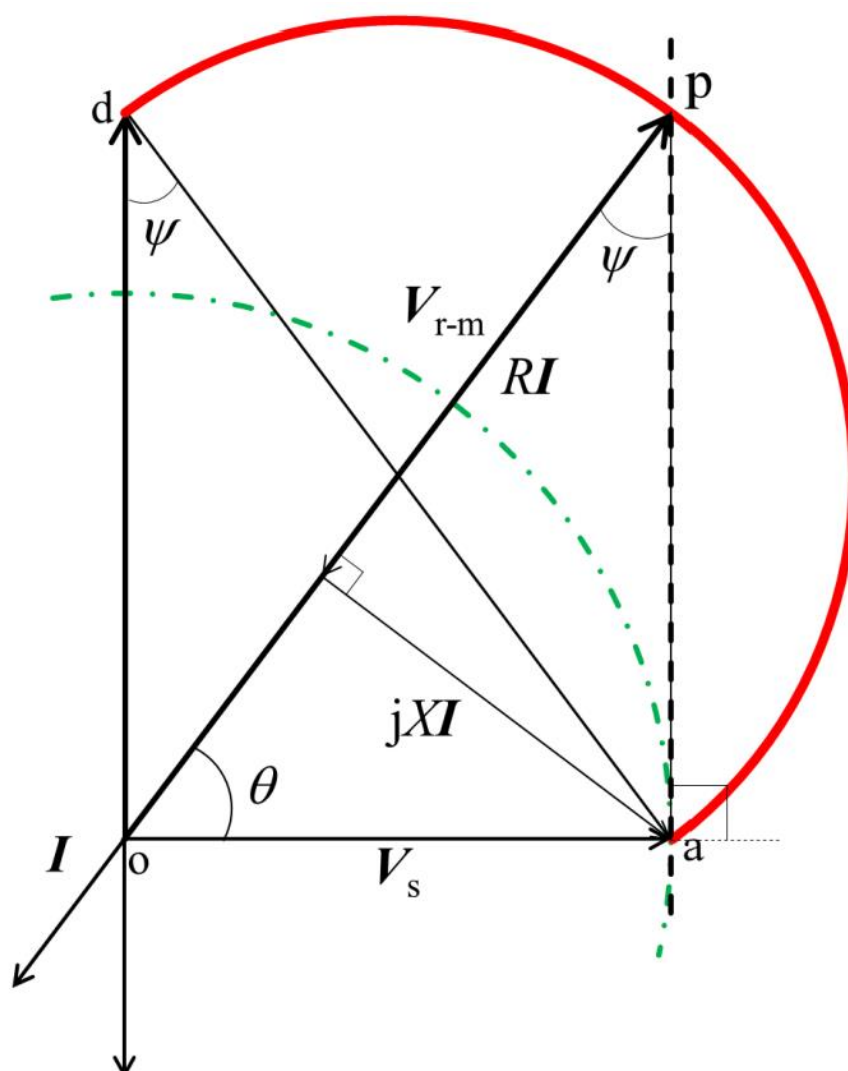


図 2-7  $R > X$  の場合に逆潮流電流が増加した場合の PV 装置連系点電圧のベクトル軌跡

続されていることを想定している。

このケースにおいて、PV 装置連系点電圧  $V_r$  は線電流  $I_L$  が 229 A になるまで増加している。PV 装置連系点電圧  $V_r$  が最大値を示した後、すなわち  $I_L = 229$  A になった後、さらに線電流  $I_L$  が増加してくると、PV 装置連系点電圧は低下していく。 $I_L$  が 366 A のとき、PV 装置連系点電圧  $V_r$  は配変送出電圧  $V_s$  と同じとなる。線電流  $I_L$  がさらに増加すると、PV 装置連系点電圧  $V_r$  は配変送出電圧  $V_s$  よりも小さくなる。このケースにおける許容される最大線電流は 381 A である。

PV 装置装置の出力電力  $P_r$  は、線電流  $I_L$  が 341 A になるまで増加する。このとき、 $P_r$  は最大になる。 $I_L$  が 229 A から 341 A の範囲では、PV 装置連系点電圧  $V_r$  は線電流  $I_L$  の増加に伴い減少するが、 $P_r$  は増加し続ける。PV 装置が定電流制御されており 341 A よりも大きな電流の出力できる場合には出力電力は低下することになる。

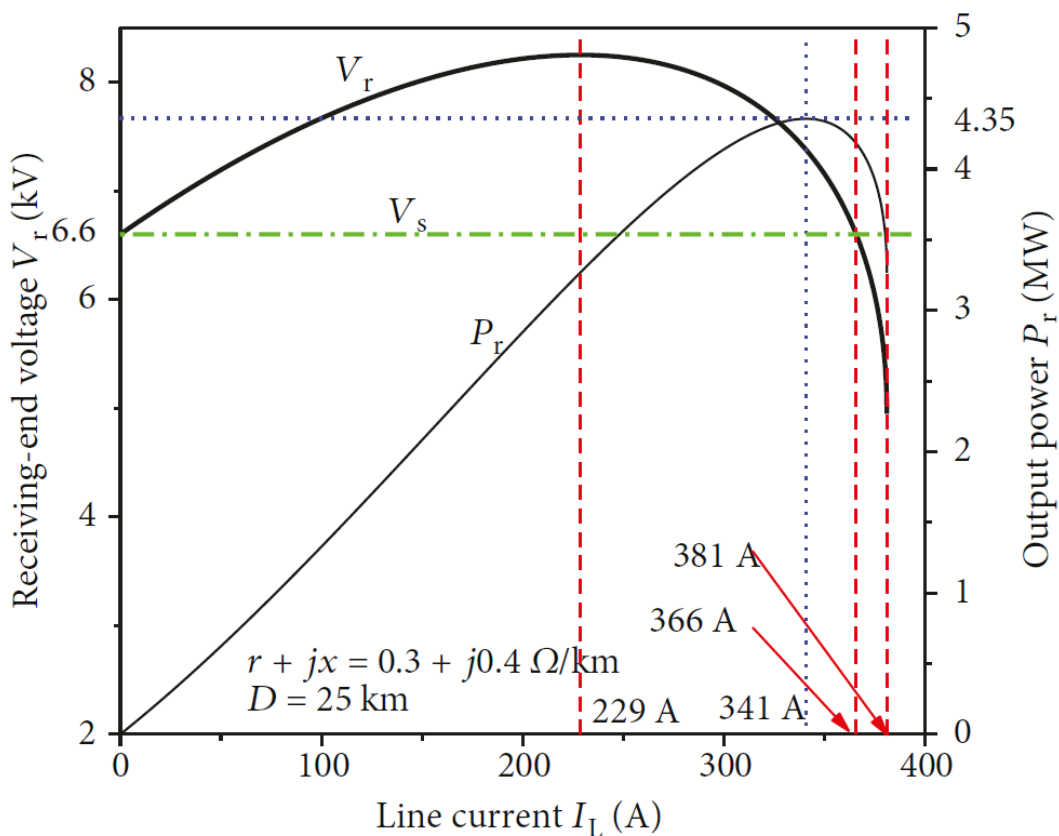


図 2-8 PV 装置連系点電圧の逆潮流電流依存性( $r+jx=0.3+j0.4 \Omega/\text{km}$ ,  $D=25 \text{ km}$ )

## 2.3 PV 装置が進み力率運転している場合

### 2.3.1 ベクトル図

図 2-9 には、PV 装置側からみて PCS が進み力率  $\cos\phi$  運転をしているときのベクトル図を示している。同図において、逆潮流電流ベクトルは、図 2-2 の場合より、力率角  $\phi$  だけ進んでいる。

ここで、2.2.1 と同様に、進み力率一定のまま逆潮流電流を増加させた場合の図を図 2-10 に示している。この場合においても、配変送出電圧に対する PV 装置連系点電圧の電圧上昇分は、 $RI$  と  $XI$  からなる  $\triangle abh$  で表され、相似的に大きくなる。この時、図 2-10 に示すように、力率  $\cos\phi$  の関係を満たすため、配変送出電圧ベクトルと PV 装置連系点電圧ベクトルとの位相差  $\theta$  は大きくなり、PV 装置連系点電圧ベクトルの先端は、点  $b$  から点  $c$  へ移動する。また、力率 1 運転時のベクトル図と比較すると、逆潮流電流  $I$  が反時計回りに力率角  $\phi$  だけ位相が進んでいるため、進み力率運転時の PV 装置連系点電圧  $V_r$  は力率 1 運転時の  $V_r$  よりも小さくなる。

### 2.3.2 ベクトル軌跡

図 2-11 には、図 2-9 のベクトル図 ( $V_r$  の先端が  $b$ ) と、PV 装置連系点電圧ベクトル  $V_r$  と配変送出電圧ベクトル  $V_s$  との位相差が直角となるまで進み力率  $\cos\phi$  一定で逆潮流電流を増加させた場合のベクトル図とを重ねて示している。また、点  $a$  から線分  $\overline{ob}$  へ垂線を引き、この交点を点  $s$  とし、線分  $\overline{ad}$  と  $\overline{ob}$  との交点を点  $q$  と示している。この時、線分  $\overline{bd}$  および線分  $\overline{as}$  を破線で描いている。

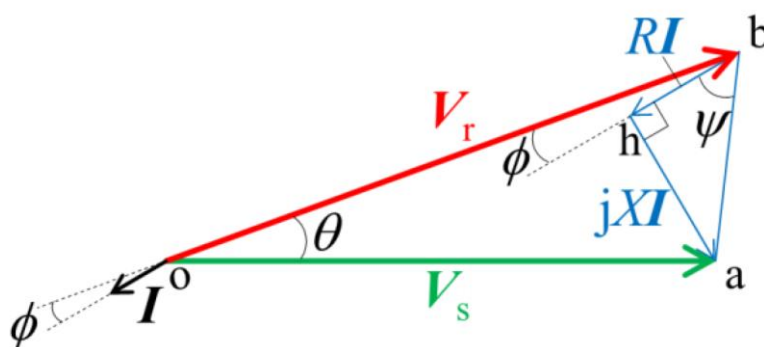


図 2-9 進み力率  $\cos\phi$  運転時のベクトル図

図 2-11 において、 $\triangle abh$  および  $\triangle adn$  は逆潮流電流による電圧上昇分を表しており、これらの三角形は相似な関係である。よって、 $\angle abh$  と  $\angle adn$  は  $\psi$  であり、 $\varepsilon = \psi + \phi$  とした場合、

$$\angle abs = \angle ado = \varepsilon \quad (2-11)$$

となる。さらに、 $\angle asb$  と  $\angle aod$  は共に直角であるため、 $\triangle abs \sim \triangle ado$  である。また、 $\triangle ado$  において、 $\angle oad$  を  $\rho$  と置いた場合、次式が成り立つ。

$$\varepsilon + \rho = \pi/2 \quad (2-12)$$

次に、 $\triangle abq$  と  $\triangle odq$  を考えると、対頂角により  $\angle aqb$  と  $\angle oqd$  は等しく、先ほど述べたように  $\angle abs$  と  $\angle ado$  も等しいため、 $\triangle abq \sim \triangle odq$  である。この関係より、 $\overline{oq} : \overline{qa} = \overline{dq} : \overline{qb}$  である。

また、 $\angle aqo = \angle bqd$  であるから、 $\triangle aqo \sim \triangle bqd$  である。つまり、

$$\angle oaq = \angle dbq = \rho \quad (2-13)$$

である。すなわち、以下の関係が成り立つ。

$$\angle abd = \pi/2 \quad (2-14)$$

式(2-14)は逆潮流電流の変化に関わらず、成り立つ。つまり、力率 1 運転時と同様に、進

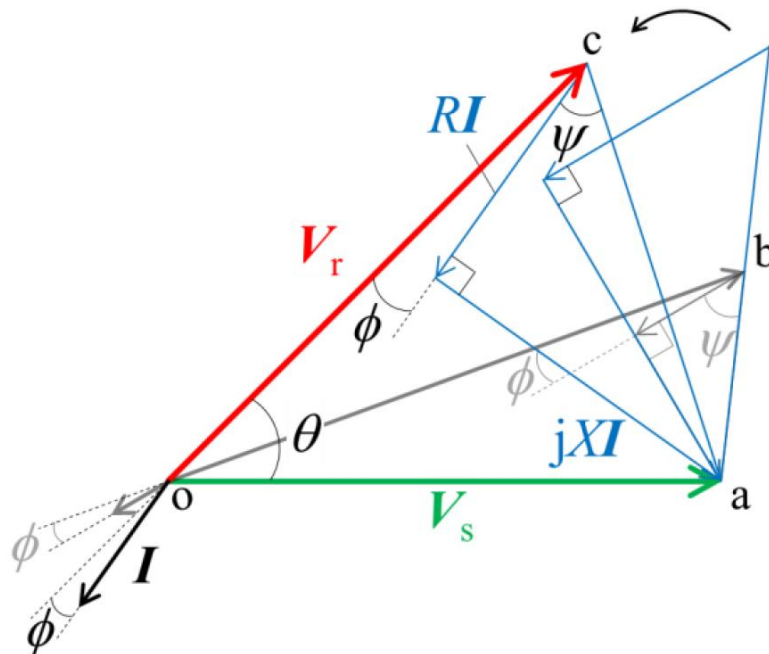


図 2-10 進み力率  $\cos\phi$  運転における逆潮流電流増加時のベクトル図

み力率  $\cos\phi$ 一定運転時においても、逆潮流電流の増加に伴って、PV 装置連系点電圧ベクトルの先端は、線分  $\overline{ad}$  を直径とする半円状を移動すると考えられる。そのベクトル図を図 2-12 に示す。

### 2.3.3 PV 装置連系点電圧の表式と許容最大逆潮流電流

図 2-9 より、進み力率  $\cos\phi$  運転時の PV 装置連系点電圧  $V_r$  の大きさは次式で与えられる。

$$V_r(I) = \sqrt{R^2 + X^2} I \cos(\varepsilon) + \sqrt{V_s^2 - \left\{ \sqrt{R^2 + X^2} I \sin(\varepsilon) \right\}^2} \quad (2-15)$$

ただし、 $\varepsilon = \psi + \phi$  である。

式(2-15)が解を持つためには、 $V_s^2 - \left\{ \sqrt{R^2 + X^2} I \sin(\varepsilon) \right\}^2 \geq 0$  を満たしている必要があるため、逆潮流電流  $I$  の範囲は、

$$0 \leq I \leq \frac{V_s}{\sqrt{R^2 + X^2} \sin(\varepsilon)} \quad (2-16)$$

である。また、式(2-16)より、許容最大逆潮流電流  $I_{\max}$  は、

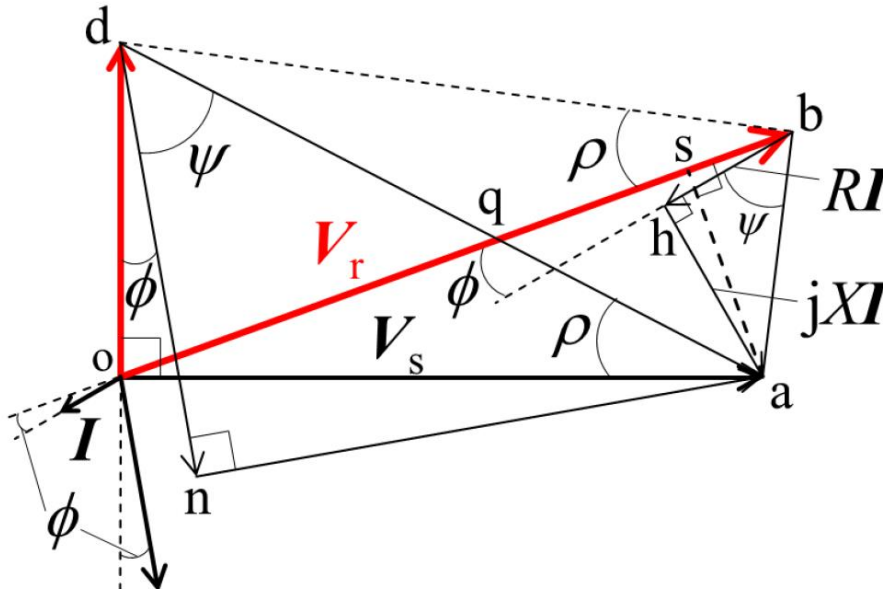


図 2-11 配変送出電圧ベクトルと PV 装置連系点電圧ベクトルとの位相角が直角になるときのベクトル図





### 2.3.4 PV 装置連系点電圧が最大になる条件

次に、ベクトル軌跡上での PV 装置連系点電圧ベクトル  $V_r$  の最大について検討する、図 2-13 に示すベクトル図では、力率角  $\phi$  とインピーダンスの偏角  $\psi$  との和が 90 度以下 ( $\phi + \psi < \pi/2$ ) の場合を描いており、点  $o$  を中心とする配変送出電圧  $V_s (=6.6\text{kV})$  を半径とする円の一部分を緑の一点鎖線で、PV 装置連系点電圧のベクトル軌跡を赤い実線で描き、これらの交点を点  $f$  とした。また、一点鎖線で描かれた円の点  $a$  での接線(図中では、黒色破線の垂直な垂線)と赤い実線のベクトル軌跡との交点を点  $p$  とした。

この赤のベクトル軌跡は、2.3.2 項で示したように、 $\overline{ad}$  を直径とする半円である。力率 1 運転時と同様に、PV 装置連系点電圧の大きさが最大となるのは、点  $o$  から最も離れたベクトル軌跡上にある点  $p$  と PV 装置連系点電圧ベクトルの先端が重なった時となる。このときの PV 装置連系点電圧の最大  $V_{r-m}$  の大きさは次式で与えられる。

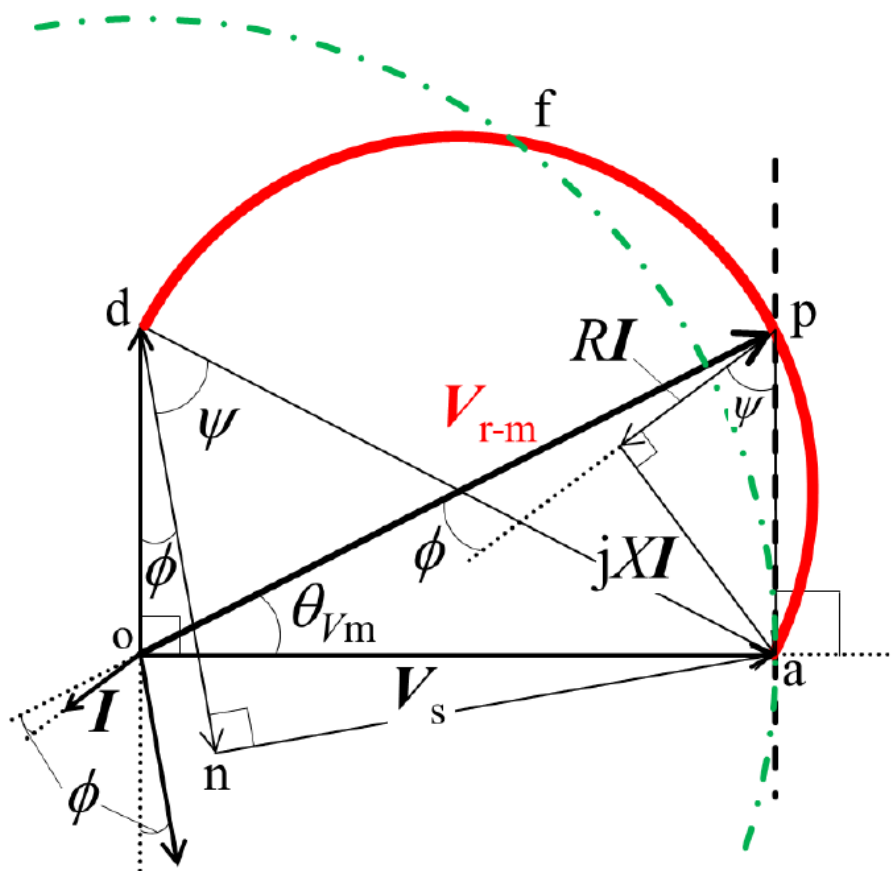


図 2-13 進み力率運転時の PV 装置連系点電圧のベクトル図 ( $\phi + \psi < \pi/2$ )

$$V_{r-m} = \frac{V_s}{\sin(\varepsilon)} \quad (2-20)$$

この時, 逆潮流電流  $I$  の大きさは,

$$I = \frac{V_s}{\sqrt{R^2 + X^2 \tan(\varepsilon)}} \quad (2-21)$$

である。よって, 図 2-13 に示すように, 力率角と線路インピーダンスの偏角との和が 90 度以下 ( $\phi + \psi < \pi/2$ ) の場合の PV 装置連系点電圧ベクトルの軌跡は, 力率 1 運転時と同様の様子を示す。

これに対し, 図 2-14 に示すような, 力率角とインピーダンスの偏角との和が 90 度以上 ( $\phi + \psi > \pi/2$ ) の場合では, 逆潮流電流の大きさに関わらず, 常に PV 装置連系点電圧は配変送出電圧より低くなることがベクトル図より明らかとなった。

また, 力率 1 の場合と同様に, 式(2-20)から分かるように, PV 装置連系点電圧の最大値は力率

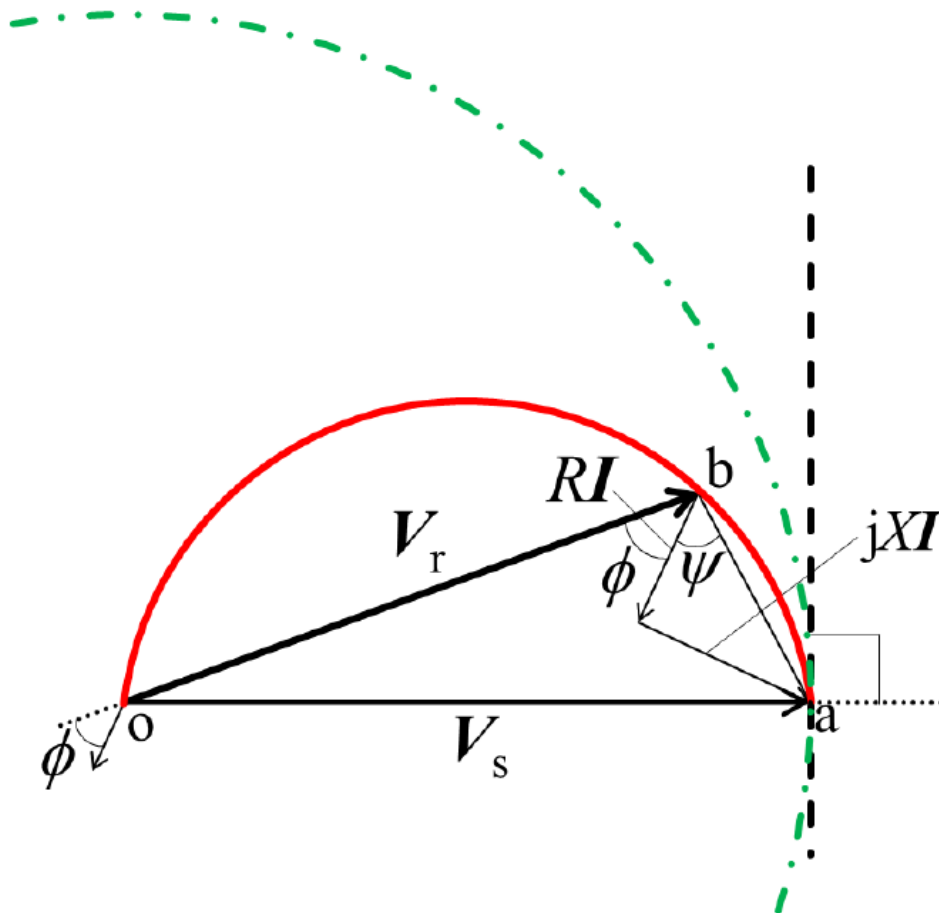


図 2-14 進み力率運転時の PV 装置連系点電圧のベクトル図 ( $\phi + \psi > \pi/2$ )

角と線路インピーダンスの偏角のみに依存している。すなわち、単位長さ当たりのインピーダンスが同じ場合、線路長が異なっても連系点電圧の最大値は同じである。その時の逆潮流電流が線路長に反比例して変化する。

## 2.4 おわりに

本章では、6.6 kV 配電系統の線路末端に大容量 PV 装置が連系された場合を取り上げ、PV 装置からの逆潮流電流が PV 装置連系点電圧に及ぼす影響を力率1運転時および進み力率運転時を想定し、ベクトル図を用いて検討をした。その結果、PV 装置逆潮流電流増加時の PV 装置連系点電圧の上昇・低下のメカニズムを電気回路論的にベクトル図を用いて明らかにし、PV 装置連系点電圧の逆潮流電流依存性に関する表式を示すことができた。この表式から、配電線路が許容できる最大逆潮流電流の条件を求めることができ、この時、配変送出電圧と PV 装置連系点電圧の位相角が $\pi/2$ となることを明らかにした。また、PV 装置連系点電圧の最大値は、線路長および逆潮流電流に関係なく、配電線の線路インピーダンスの位相角で決まることが明らかになった。

## 第 2 章の参考文献

- [1] 松村年郎, 雪田和人, 後藤泰之, 塚本真澄, 立脇建人, 横水康信:「大容量太陽光発電装置の高圧配電系統末端への導入に伴う配電系統の電圧上昇・低下メカニズムに関する回路論的考察」, 電気学会論文誌 B, Vol.138, No.1, pp.23-29, DOI: 10.1541/ieejpes.138.23, [https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejpes/138/1/138\\_23/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejpes/138/1/138_23/_pdf) (2018)

## 第3章 高圧配電システムの末端に大容量 PV 装置が接続された場合の電力潮流とその有効利用

### 3.1 はじめに

第 2 章では、高圧配電システムの末端に大容量 PV 装置が接続された場合を取り上げ、逆潮流電流が変化したときの PV 装置連系点電圧の上昇・低下のメカニズムをベクトル図を用いて明らかにした。本章では、電力システムで発生する各種有効電力(電力潮流)の大小関係が、ベクトル図上で表されることを指摘する。

### 3.2 力率 1 運転の場合

#### 3.2.1 有効電力の表式

図 3-1 および図 3-2 に、それぞれ、本研究で想定している配電システムの単相等価回路(図 2-1)および力率 1 の場合において配変送出電圧  $V_s$  を基準にした PV 装置連系点電圧  $V_r$  と逆潮流電流  $I$  のベクトル図(図 2-2)を再掲しておく。図 3-2 において、 $V_s$  と  $V_r$  との位相差を  $\theta$  としている。PV 装

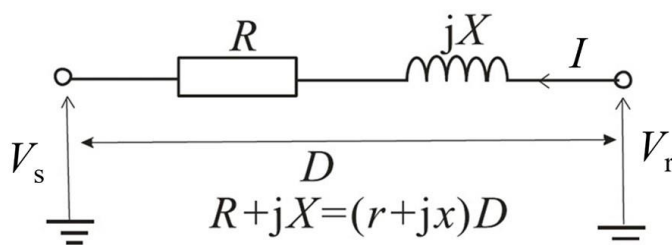


図 3-1 本研究で想定した配電システムの単相等価回路

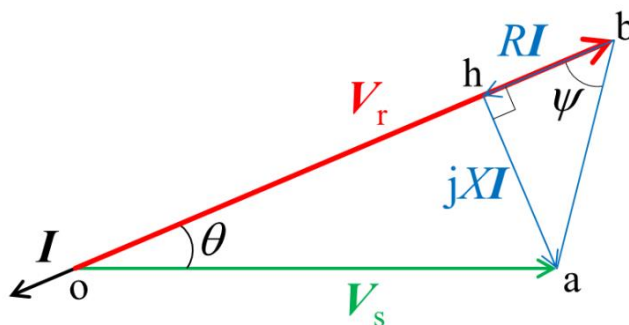


図 3-2 PV 装置連系点電圧  $V_r$ 、配変送出電圧  $V_s$ 、および逆潮流電流  $I$  のベクトル図

置出力を力率 1 としているので、PV 装置から出力される電力は  $P_r = V_r I$  で与えられ、配電変電所に流入する電力は  $P_s = V_s I \cos \theta$  で与えられる。

ここで、 $\Delta abo$ 、 $\Delta abh$ 、 $\Delta aho$  の面積は、次式で表される。

$$\Delta abo \text{ の面積} = \frac{1}{2} V_r X I = \frac{X}{2} P_r \quad (3-1)$$

$$\Delta abh \text{ の面積} = \frac{1}{2} R I X I = \frac{X}{2} R I^2 \quad (3-2)$$

$$\Delta aho \text{ の面積} = \frac{1}{2} (V_s \cos \theta) X I = \frac{X}{2} P_s \quad (3-3)$$

上記の式から、PV 装置から出力される有効電力  $P_r$  および配電用変電所に流入する有効電力  $P_s$  がベクトル図上における  $\Delta abo$  および  $\Delta aho$  の面積の  $2/X$  倍でそれぞれ表されることがわかる。同様に、 $\Delta abh$  の  $2/X$  倍が、線路インピーダンス  $R$  で消費される有効電力損失  $P_L$  を表している。すなわち、 $P_r$ 、 $P_s$  および  $P_L$  の大小関係をベクトル図上の三角形の面積で相対的に比較することができる。

### 3.2.2 PV 装置から出力できる最大許容有効電力

第 2 章で述べた通り、図 3-3 のベクトル図に示したように、PV 装置連系点電圧ベクトル  $V_r$  の先端は逆潮流電流  $I$  の増加に伴い点 a から点 b や点 g を通って、点 d まで移動する。したがって、PV 装置からの出力電力  $P_r$  を表す三角形(例えば、 $\Delta abo$ )も同様に変化する。すなわち、この三角形が最大の面積となる条件を求めることで、PV 装置からの出力電力  $P_r$  が最大となる条件を求めることができる。同図において  $P_r$  に対応する三角形は、 $\overline{oa}$  を底辺とする三角形であるので、PV 装置連系点電圧ベクトル  $V_r$  の先端が点 g にあるときに高さが最大になることから面積も最大になる。したがって、PV 装置からの逆潮流電流  $I$  が増加し、PV 連系点電圧ベクトル  $V_r$  の先端が点 a から点 g まで移動している範囲は、PV 装置が出力する電力は増加し続ける。さらに電流が増加すると、PV 装置連系点電圧ベクトル  $V_r$  の先端は点 g から点 d まで移動する。この場合には、PV 装置から出力される有効電力  $P_r$  に対応した三角形の面積は減少していく。すなわち逆潮流電流を増やしても、PV 装置からの出力電力がかえって低下してしまうことが分かる。

以上の場合、PV 装置の出力電力の大きさに関係なく、電気回路論的に PV からの逆潮流電流を制御出来るとした場合である。しかしながら、PV 装置が電力を制御している場合には、動作点は点 g を超えることはなく、点 g が最大動作点になる。この PV 装置から出力される最大許容有効

電力を  $P_{\max}$  と記述することとする。

なお、点  $g$  から線分  $\overline{oa}$  に対して垂線を引いており、線分  $\overline{oa}$  との交点を点  $a_2$  とした。△ $ago$  は二等辺三角形であるので、線分  $\overline{og}$  と  $\overline{ag}$  の長さは等しい、したがって、点  $a_2$  は線分  $\overline{oa}$  の中点である。

### 3.2.3 PV 装置から出力できる最大許容有効電力の表式

図 3-3 より、 $R = rD$ 、 $X = xD$  であるため、次式が求められる。

$$(V_r - rDI)^2 + (xDI)^2 = V_s^2 \quad (3-4)$$

$$V_r^2 - 2rDI V_r + (rDI)^2 + (xDI)^2 = V_s^2 \quad (3-5)$$

ここで、 $P_r = V_r I$  とすると、

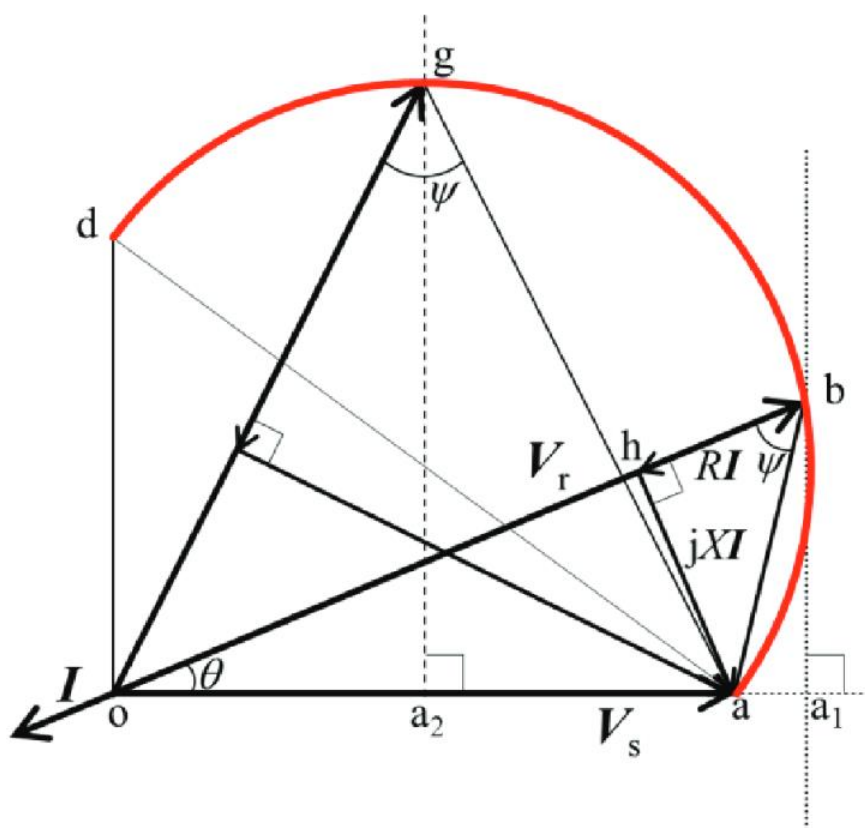


図 3-3 PV 装置から出力される有効電力が最大となる場合のベクトル図

$$V_r^2 - 2rDP_r + \left(rD \frac{P_r}{V_r}\right)^2 + \left(xD \frac{P_r}{V_r}\right)^2 = V_s^2 \quad (3-6)$$

$$V_r^4 - (2rDP_r + V_s^2)V_r^2 + (zD)^2 P_r^2 = 0 \quad (3-7)$$

ただし,  $z = \sqrt{r^2 + x^2}$

2 次方程式の解の公式より,

$$V_r^2 = \frac{(2rDP_r + V_s^2) + \sqrt{(2rDP_r + V_s^2)^2 - 4(zD)^2 P_r^2}}{2} \quad (3-8)$$

したがって, 線路末端の電圧  $V_r$  と PV 装置が出力する電力  $P_r$  との関係は

$$V_r = \sqrt{\frac{V_s^2 + 2rDP_r + \sqrt{V_s^4 + 4rDV_s^2 P_r - 4(xD)^2 P_r^2}}{2}} \quad (3-9)$$

この式が実数解を持つためには,

$$V_s^4 + 4rDV_s^2 P_r - 4(xD)^2 P_r^2 \geq 0 \quad (3-10)$$

でなければならない。

したがって, PV 装置が出力できる電力は, 下記のように表される。

$$0 \leq P_r \leq \frac{r + \sqrt{r^2 + x^2}}{2x^2 D} V_s^2 \quad (3-11)$$

すなわち, PV 装置が出力できる最大電力  $P_{\max}$  は

$$P_{\max} = \frac{r + \sqrt{r^2 + x^2}}{2x^2 D} V_s^2 \quad (3-12)$$

これらの式から以下のことがいえる。

- (1) PV 装置が出力できる最大電力は, 配変送出電圧  $V_s$  の 2 乗に比例している。したがって, 配変送出電圧を上昇させれば, PV 装置から出力できる最大許容有効電力は効果的に増加する。
- (2) PV 装置が出力できる最大許容有効電力は, 線路長  $D$  に反比例している。したがって, 長距離配電システムの末端に PV 装置を導入することは短距離の配電システムに導入する場合と比較して, 最大許容有効電力が低下するので, 効果的ではない。
- (3) 線路インピーダンスの抵抗成分が小さければ, PV 装置が出力できる最大許容有効電力もまた減少する。(詳細は, 後述の 3.3 節以降で述べているが, 実際には, 配電用変電所に流入する電力は抵抗成分に依存していないため, PV 装置が出力できる最大許容電力が減少することは, 線路損失が減少するということであり, 電力を有効的に利用できている。)



### 3.2.4 PV 装置連系点電圧と PV 装置からの出力有効電力に関する定量的検討

図 3-4 には、線路末端の電圧  $V_r$  および線電流  $I_L (= I/\sqrt{3})$  の PV 装置からの出力電力  $P_r$  依存性を示す。同図において、線路インピーダンスが  $r+jx=0.3+j0.4 \Omega/\text{km}$  の場合を実線で描いており、 $r+jx=0.15+j0.4 \Omega/\text{km}$  の場合を破線で描いている。線路インピーダンスが  $r+jx=0.3+j0.4 \Omega/\text{km}$  の場合では、PV 装置から出力できる最大電力は 4.36 MW であり、その時の電流は 341 A である。また、この場合において、PV 装置連系点電圧  $V_r$  は常に配変送出電圧  $V_s$  (黄緑の一点鎖線) よりも大きい。2.2.5 項で述べたように、この線路インピーダンスにおける最大電流は 381 A であるため、PV 装置が電流制御を行った場合には、電流を 341 A 以上流すことができるが、その場合には  $V_r$  が低下し、結果的に出力電力が低下することになる。電力を制御する場合においては、上記の範囲で制御する必要があるため、電流は 341 A 以上流すことができない。

次に、線路インピーダンスが  $r+jx = 0.15+j0.4 \Omega/\text{km}$  の場合において、PV 装置から出力できる最

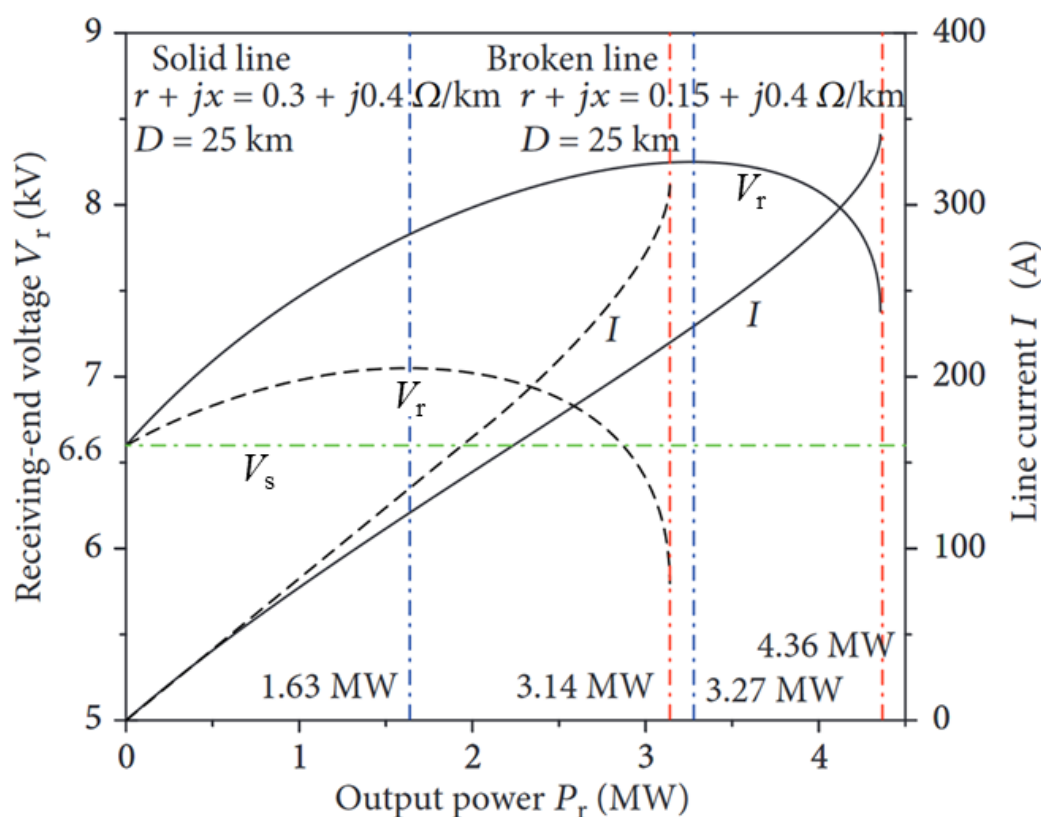


図 3-4 異なる線路インピーダンスにおける線路途中電圧の PV 装置出力電力依存性

大有効電力は 3.14 MW であり, その時の線電流  $I_L$  は 312 A である。これらの大きさは,  $r+jx = 0.3+j0.4 \Omega/\text{km}$  の場合と比べて小さい。また, この場合においては,  $V_r$  が  $V_s$  を下回る場合が出てくる。

以上の結果から, 電線の導体断面積が大きいほど, 線路末端の電圧の上昇を抑制することができるが, PV 装置からの出力電力の限界は低下するということがわかった。

### 3.2.5 配電用変電所に流入する最大有効電力

図 3-3 から分かるように, PV 装置の動作点がたとえ点 b から移動したとしても,  $\angle aho$  は常に  $\pi/2$  である。したがって, 図 3-5 において点線で示されているように, 点 h の軌跡は線分  $oa$  を直径とした半円を描く。

さらに,  $\Delta aho$  の面積 (=配電用変電所に流入する有効電力) は, 点 h が点線で描かれている半円の頂点である点 k の位置まで移動したときに最大となる。 $\Delta ako$  は二等辺三角形であり

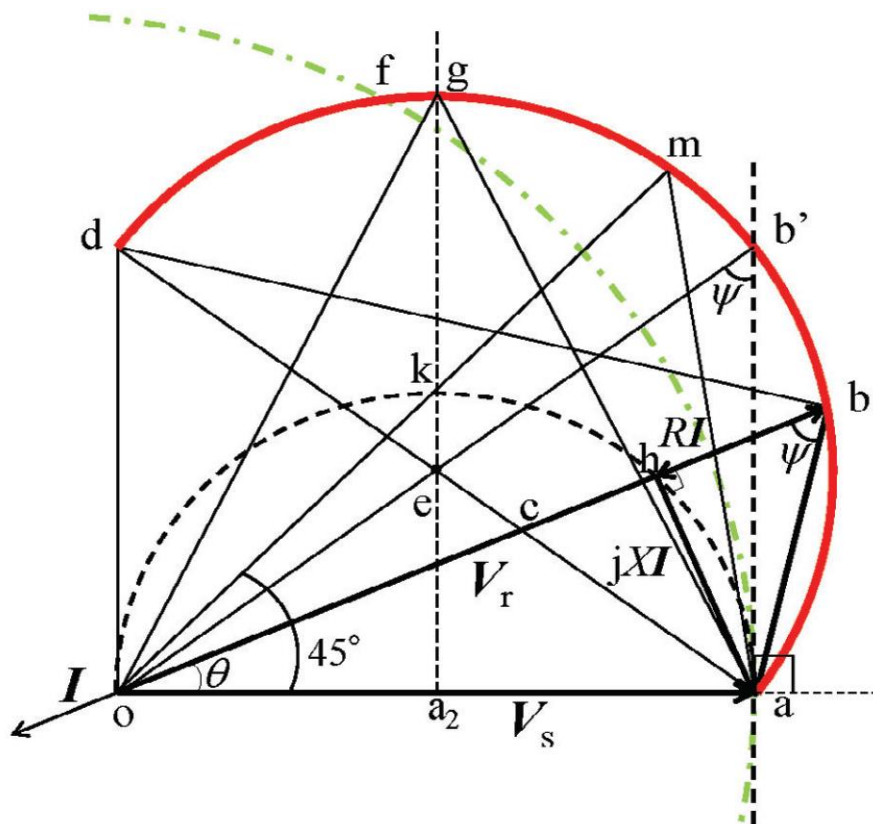


図 3-5 点 h の軌跡のベクトル図

$\angle ako = \pi/2$  なので、 $\angle aom (= \angle aok)$  は  $\pi/4$  である。したがって、配電用変電所に流入する有効電力  $P_s$  が最大になるのは、PV 連系点電圧ベクトル  $V_r$  と配電用変電所からの送り出し電圧ベクトル  $V_s$  の位相角  $\theta$  が  $\pi/4$  となるときであることがわかる。

図 3-5 より下記のことがわかる。

1. 点 a から点 m の間：PV 装置からの逆潮流電流  $I$  の増加によって、配電用変電所に流入する有効電力  $P_s$  および PV 装置から出力される有効電力  $P_r$  は増加する。すなわち、 $P_r$  の増加に伴い  $P_s$  もまた増加する。
2. 点 m：配電用変電所に流入する有効電力  $P_s$  は点 m において最大になる。また、この時、PV 装置連系点電圧ベクトル  $V_r$  と配電用変電所からの送り出し電圧ベクトル  $V_s$  の位相角  $\theta$  は  $\pi/4$  である。
3. 点 m から点 g の間：PV 装置から出力される逆潮流電流  $I$  の増加に伴って、PV 装置から出力される有効電力  $P_r$  は増加する。一方で、配電用変電所に流入する有効電力  $P_s$  は減少する。すなわち、PV 装置から出力される有効電力  $P_r$  の増加に伴い、配電用変電所に流入する有効電力  $P_s$  は減少する。これは、線路における電力損失  $P_L$  が大きく増加するためである。
4. 点 g から点 d の間：PV 装置から出力される逆潮流電流  $I$  の増加に伴って、PV 装置から出力される有効電力  $P_r$  および配電用変電所に流入する有効電力  $P_s$  は減少する。一方で、線路における電力損失  $P_L$  は増加し続ける。
5. 点 d：PV 装置から出力された有効電力  $P_r$  は全て線路における電力損失  $P_L$  となり、配電用変電所に有効電力は届かない。すなわち、線路における電力損失  $P_L$  が最大となる。
6.  $\triangle abh$  の面積と  $\triangle aho$  の面積とが等しくなる時、PV 装置からの出力される有効電力  $P_r$  の半分が線路の損失となり、残りの半分だけが配電用変電所へと流入する。

上述のように、動作点 m よりも大きな容量の PV 装置を接続しても、線路で消費される電力損失が増えていくのみであり、配電用変電所近傍の負荷へ供給される電力はかえって減少する。すなわち、配電用変電所の直近に集中して電氣的負荷が存在し配電線路途中に負荷がない場合、線路末端に接続される PV 装置の容量には、電力の有効利用の観点から、上限が存在することを明らかに出来た。

もし、線路の抵抗  $R$  が変化した場合には、 $RI$  (図 3-3 の  $\overline{hb}$ ) の大きさが変化するため、PV

連系点電圧ベクトル  $V_r$  の先端が描くベクトル軌跡  $agd$  もまた変化する。しかしながら、 $XI$  (図 3-3 の  $\overline{oh}$ ) の大きさは変化しないため、点  $h$  が描く軌跡  $oka$  は変化しない。したがって、配電用変電所に流入する最大有効電力  $P_{smax}$  は線路抵抗  $R$  には依存せずに線路リアクタンス  $X$  にのみ依存していることが明らかになった。

### 3.3 大容量 PV 装置が接続された高圧配電系統における有効電力(進み力率運転の場合)

#### 3.3.1 有効電力の表式

図 3-6 には、PV 装置が進み力率  $\phi$  で動作している場合における線路末端の電圧  $V_r$  のベクトル軌跡を描いている。同図は、PV 装置連系点電圧  $V_r$  が点  $b$  にあるときを表しており、 $\Delta abh$  は線路に逆潮流電流が流れた場合における電圧上昇分を表している。さらに、点  $o$  から、直線  $bh$  に対して垂直な線を描き、両者の交点を点  $q$  と名付けた。同図において、各有効電力は下記のように求めることができる。

$$\Delta abq \text{ の面積} = \frac{1}{2} V_r XI \cos \phi = \frac{X}{2} P_r \quad (3-13)$$

$$\text{ここで、} P_r = V_r XI \cos \phi$$

$$\Delta abh \text{ の面積} = \frac{1}{2} RIXI = \frac{X}{2} RI^2 = \frac{X}{2} P_L \quad (3-14)$$

$$\text{ここで、} P_L = RI^2$$

$$\Delta ahq \text{ の面積} = \frac{1}{2} V_s \cos(\theta + \phi) XI = \frac{X}{2} P_s \quad (3-15)$$

$$\text{ここで、} P_s = IV_s \cos(\theta + \phi)$$

したがって、たとえ進み力率運転をしていたとしても、PV 装置の出力電力  $P_r$ 、線路における電力損失  $P_L$ 、配電用変電所に流入する電力  $P_s$  は、 $\Delta abp$ 、 $\Delta abh$ 、 $\Delta ahq$  の面積ととしてそれぞれ相対的に表すことができる。

図 3-6 において、PV 装置からの逆潮流電流  $I$  が増加したことにより、PV 連系点電圧ベクトル  $V_r$  が点  $d_1$  に到達したとき、PV 装置からの逆潮流電流ベクトル  $I$  と配変からの送り出し電圧ベクトル  $V_s$  との位相角は  $\pi/2$  になる。この場合において、 $\Delta ahq$  の面積はゼロとなる。つまり、配電用変電所に

流入する電力  $P_s$  は 0 W になる。

### 3.3.2 PV 装置から出力される最大許容有効電力

図 3-6 において、PV 装置から出力される有効電力に対応した  $\Delta abq$  の面積は、 $\frac{\overline{bq} \times \overline{ah}}{2}$  により求めることができる。 $\Delta abo$  の面積は  $\frac{\overline{bo} \times \overline{ab} \sin(\phi + \psi)}{2}$  である。 $\overline{bo} = \overline{bq} / \cos \phi$  および  $\overline{ah} = \overline{ab} \sin \psi$  より、 $\Delta abo$  の面積は  $\frac{\overline{bq} \times \overline{ah}}{2} \times \frac{\sin(\phi + \psi)}{\cos \phi \sin \psi}$  と表される。つまり、 $\Delta abo$  の面積は PV 装置からの出力電力を表している  $\Delta abq$  の面積に比例していることがわかる。したがって、 $\Delta abo$  の面積が最大になるまで逆潮流電流が増加したとき、 $\Delta abq$  の面積もまた最大になる。換言すれば、図 3-7 に示すように、動作点  $b$  が PV 装置連系点電圧ベクトル  $V_r$  の先端が描くベクトル軌跡上の頂点  $g$  まで移動したとき PV 装置からの出力電力  $P_r$  は最大値となる。この傾向は、3.1 節で示した力率が 1 における場合と似ている。

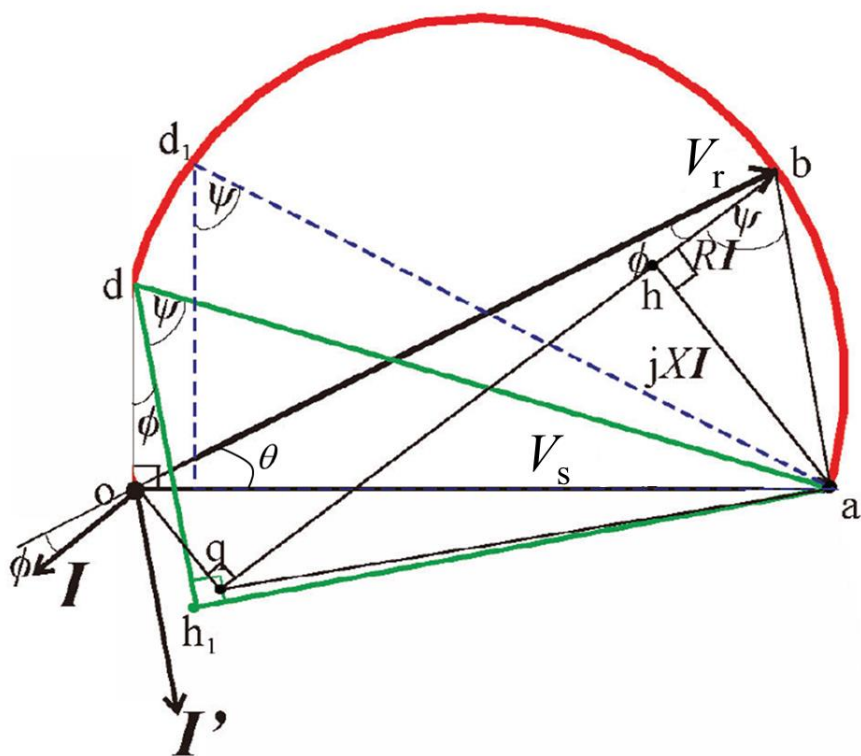


図 3-6 進み力率運転時におけるベクトル上での有効電力



は最大となる。

### 3.3.4 PV 装置連系点電圧ベクトル $V_r$ と配変送出電圧ベクトル $V_s$ の位相角 $\theta$

図 3-8 において、点 a, 点 b, 点 o および点  $h_1$  は円 A 上に存在しているため、

$$\angle oah_1 = \angle obh_1 = \phi$$

一方、図 3-9 において、点 a, 点 h, 点  $a_4$  および点  $h_1$  は円 B 上に存在している。ここで、点  $a_4$  は直線 ao と円 B の交点である。

すなわち、

$$\angle a_4hh_1 = \angle a_4ah_1 = \angle oah_1 = \phi$$

であることから、直線  $ha_4$  は直線 ob と並行である。したがって、PV 装置連系点電圧ベクトル  $V_r$  と配変送出電圧ベクトル  $V_s$  の位相角  $\theta$  は図 3-9 の  $\angle aa_4h$  と等しい、すなわち、

$$\theta = \angle aob = \angle aa_4h \quad \theta = \angle aob = \angle aa_4h$$

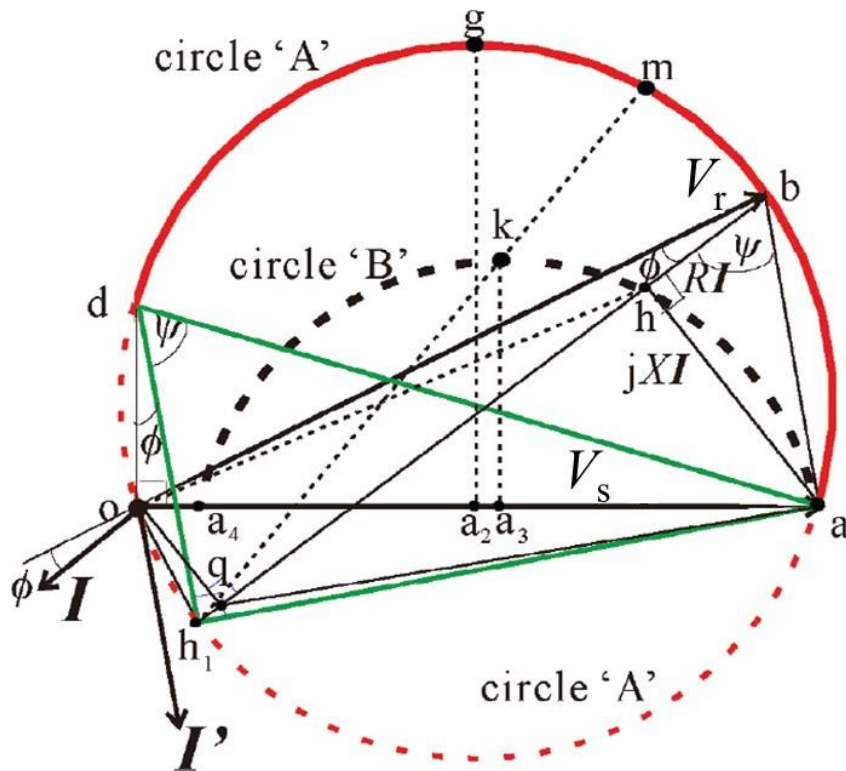


図 3-8 配電用変電所に流入する有効電力が最大となる場合のベクトル図





### 3.3.6 PV 装置から出力される最大有効電力の力率依存性

配変送出電圧  $V_s$  および線路インピーダンス  $R+jX=(r+jx)D$  が変わらなければ、図 3-7 おける配変送出電圧  $V_r$  の軌跡(赤い太線)の直径は図 3-3 おける  $V_r$  の直径(赤い太線)よりも小さくなる。すなわち、図 3-3 の  $\triangle aog$  の高さよりも図 3-7 の  $\triangle aog$  の高さの方が小さい。したがって、図 3-7 における  $\triangle aog$  の面積は図 3-3 の  $\triangle aog$  の面積よりも小さくなる。3.2.2 項より、図 3-7 の PV 装置から出力できる最大電力に対応している  $\triangle agq_m$  の面積は下記のように表される。

$$\triangle agq_m \text{ の面積} = \frac{\overline{gq_m} \times \overline{ah_m}}{2} = \frac{\frac{ao \times ga_2}{\sin(\phi + \psi)}}{2} = \frac{\frac{ao \times ga_2}{1 + \frac{\tan \phi}{\tan \psi}}}{2} = \frac{\triangle aog \text{ の面積}}{1 + \frac{\tan \phi}{\tan \psi}}$$

すなわち、図 3-7 において、 $\triangle agq_m$  の面積は  $\triangle aog$  の面積よりも小さくなる。したがって、進み力率  $\phi$  が増加するにつれて、図 3-7 おける  $\triangle agq_m$  の面積は図 3-3 おける  $\triangle aog$  の面積よりも小さくな

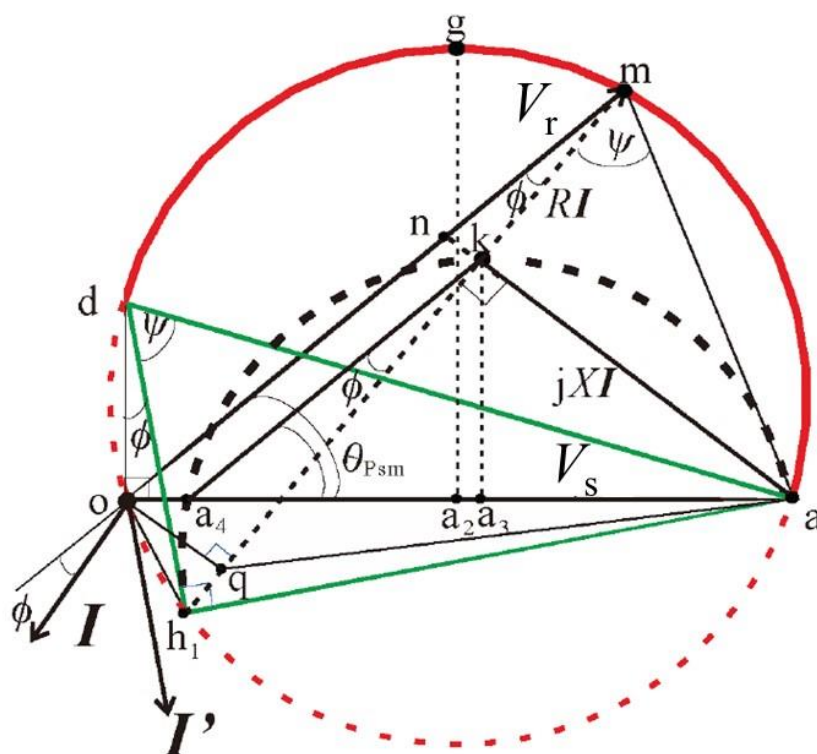


図 3-10 配変用変電所に流入する有効電力が最大になるときの位相角を表すベクトル図

る。つまり、進み力率である場合の PV 装置から出力される最大有効電力は、力率 1 運転している場合と比べて、必ず減少することがわかる。

### 3.3.7 配電用変電所に流入する最大有効電力の力率依存性

配変送出電圧  $V_s$  および線路インピーダンス  $R+jX = (r+jx)D$  が等しければ、図 3-10 における点  $h$  の軌跡の直径(黒破線の円)は図 3-5 の点  $h$  の軌跡の直径よりも小さくなる。さらに、図 3-10 におけるこの半円は、力率に対応して傾く。すなわち、図 3-10 における  $\triangle aka_4$  の面積は図 3-5 における  $\triangle ako$  よりも小さくなる。したがって、進み力率制御をすると、配電用変電所に流入する最大有効電力は必ず減少することがわかる

### 3.3.8 線路インピーダンスの影響

図 3-10 において、線路抵抗  $R$  の減少は配変送出電圧  $V_r$  の軌跡(赤い円)の大きさを小さくさせる。しかしながら、点  $h$  の軌跡(黒破線の円)の大きさは線路リアクタンス  $X$  にのみ依存しているため変化しない。したがって、もし抵抗成分が小さな導体が配電線路に採用された場合には、配変送出電圧  $V_r$  の上昇は抑制されることになるが、PV 装置から出力できる最大有効電力が減少する。しかしながら、配電用変電所に流入する有効電力は変化しない。このように、PV 装置からの電力を効率的に活用するための手段として、抵抗成分が小さな電線を配電線に利用することが有効であるとわかる。

## 3.4 PV 装置から出力された有効電力と配電用変電所に流入する有効

### 電力との関係

図 3-9 において、PV 装置から出力された有効電力  $P_r$  に対する配電用変電所に流入する有効電力  $P_s$  の分率  $P_s/P_r$  は、下記の様に表される。

$$\frac{P_s}{P_r} = \frac{\overline{hq}}{bq}$$

図 3-10 において、直線  $ak$  と直線  $om$  との交点を点  $n$  とした。同図に示したような配電用変電所に流入する有効電力が最大( $=P_{smax}$ )である場合、次式が成立する。

$$\frac{P_{smax}}{P_{r-Psm}} = \frac{\overline{kq}}{\overline{mq}} = \frac{\overline{no}}{\overline{mo}}$$

ここで、 $P_{r-Psm}$  は配電用変電所に流入する電力が最大となるときに PV 装置から出力される有効電力である。 $\Delta mkn$  において、線分  $\overline{mn}$  の長さは、

$$\overline{mn} = \frac{RI}{\cos \phi}$$

である。

3.3.5 項で説明したように  $\angle aon = \angle oan = \theta_{psm}$  であることから、 $\Delta aon$  は二等辺三角形である。

すなわち、 $\overline{no} = \overline{na} = \overline{nk} + \overline{ka} = RI \tan \phi + XI$ 。

したがって、

$$\begin{aligned} \frac{P_{smax}}{P_{r-Psm}} &= \frac{R \tan \phi + X}{\frac{R}{\cos \phi} + R \tan \phi + X} = \frac{R \sin \phi + X \cos \phi}{R + R \sin \phi + X \cos \phi} \\ \therefore \frac{P_{smax}}{P_{r-Psm}} &= \frac{r \sin \phi + x \cos \phi}{r + r \sin \phi + x \cos \phi} = \frac{\sin \phi + \tan \psi \cos \phi}{1 + \sin \phi + \tan \psi \cos \phi} \end{aligned} \quad (3-16)$$

力率が 1 の場合 ( $\phi = 0$ ) には、

$$\left. \frac{P_{smax}}{P_{r-Psm}} \right|_{\phi=0} = \frac{X}{R+X} = \frac{x}{r+x} = \frac{\tan \psi}{1 + \tan \psi} \quad (3-17)$$

図 3-11 に、異なる力率  $\phi$  に対する分率  $P_{smax}/P_{r-Psm}$  を、線路インピーダンスの偏角  $\psi$  の関数として、示す。同図から次のことが分かる。リアクタンスよりも抵抗を小さくすることで PV 装置から発電される有効電力の半分以上を配電用変電所に届けることができる。また、 $P_{smax}/P_{r-Psm}$  は線路の長さには依存していない。

### 3.5 配電用変電所に流入する有効電力が最大となる場合の PV 装置の出力電力と PV 装置が出力できる最大許容有効電力との関係

図 3-7 から図 3-10 において、 $\Delta oag$  の面積  $S_{oag}$  は  $\frac{\overline{oa} \times \overline{ga}_2}{2}$  で与えられる。

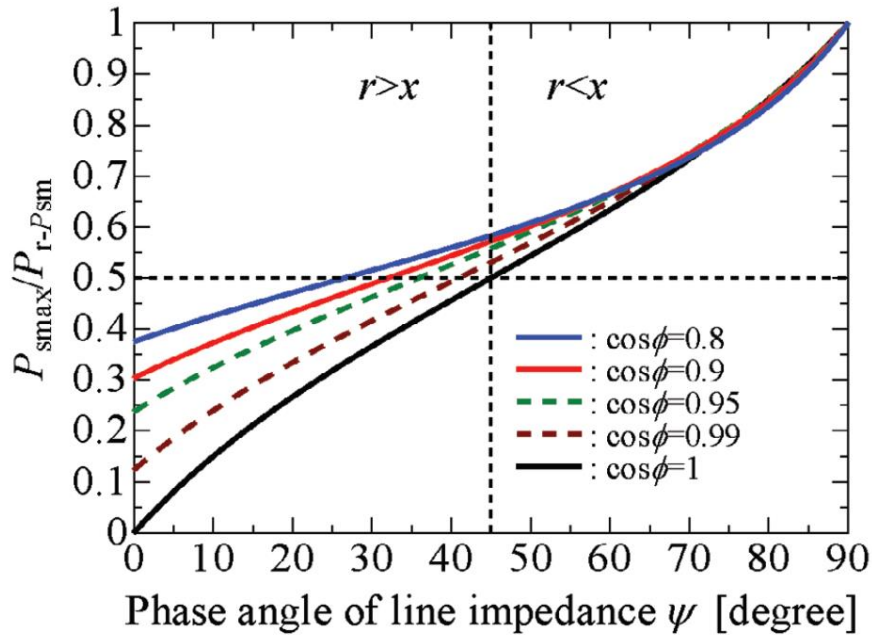


図 3-11  $P_{smax}/P_{r-Psm}$  の線路インピーダンスの偏角  $\psi$  依存性

$$\overline{ga_2} = \frac{\overline{oa}}{2 \tan\left(\frac{\psi + \phi}{2}\right)} \text{ であることから,}$$

$$S_{oag} = \frac{(\overline{oa})^2 / 2}{2 \tan\left(\frac{\psi + \phi}{2}\right)} \quad (3-18)$$

同様の方法で、 $\triangle oam$  の面積  $S_{oam}$  は以下の様に表される。

$$S_{oam} = \frac{(\overline{oa})^2 / 2}{\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) + \tan\left(\psi + \frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{4}\right)} \quad (3-19)$$

$$\therefore \frac{S_{oam}}{S_{oag}} = \frac{2 \tan\left(\frac{\psi + \phi}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) + \tan\left(\psi + \frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{4}\right)} \quad (3-20)$$

3.3.2 項で説明したように、図 3-7 おいて  $P_{rmax}$  に対応した  $\triangle agqm$  の面積  $S_{agqm}$  と図 3-10 おいて  $P_{r-Psm}$  に対応した  $\triangle amq$  の面積  $S_{amq}$  はそれぞれ以下の様に示される。

$$S_{agqm} = S_{oag} \times \frac{\cos \phi \sin \psi}{\sin(\phi + \psi)}$$

$$S_{\text{amq}} = S_{\text{oam}} \times \frac{\cos \phi \sin \psi}{\sin(\phi + \psi)}$$

$$\therefore \frac{P_{\text{r-Psm}}}{P_{\text{rmax}}} = \frac{2 \tan\left(\frac{\psi + \phi}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) + \tan\left(\psi + \frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{4}\right)} \quad (3-21)$$

図 3-12 に、分率  $P_{\text{r-Psm}}/P_{\text{rmax}}$  の線路インピーダンス偏角依存性を、力率をパラメータに取って描いている。この場合においても、分率  $P_{\text{r-Psm}}/P_{\text{rmax}}$  は配電線路の長さには依存していない。

PV 装置から発電された有効電力を効率的に利用することは重要なことである。負荷が配電用変電所近辺に集中して存在すると仮定した場合においては、配電用変電所に流入する有効電力が最大となるときの PV 装置からの出力電力  $P_{\text{r-sPsm}}$  が PV 装置の適切な容量であると言える。すなわち、設置すべき PV 装置の容量は最大許容有効電力  $P_{\text{rmax}}$  ではなく、 $P_{\text{r-Psm}}$  とすべきである。

### 3.6 PV 装置連系点電圧 $V_r$ と PV 装置からの出力電力 $P_r$ との関係性に関する考察

#### 3.6.1 力率 $\cos \phi$ 運転時における PV 装置連系点電圧 $V_r$ の $P_r$ 依存性

図 3-6 より、次式が導かれる。

$$\left(V_r - \sqrt{r^2 + x^2} D \cos(\phi + \psi) I\right)^2 + \left(\sqrt{r^2 + x^2} D \sin(\phi + \psi) I\right)^2 = V_s^2 \quad (3-22)$$

$P_r = V_r I \cos \phi$  であるので、式(3-22)に  $I = \frac{P_r}{V_r \cos \phi}$  を代入して整理すると、

$$V_r^4 \cos^2 \phi - 2\sqrt{r^2 + x^2} D \cos(\phi + \psi) P_r \cos \phi V_r^2 + \left(\sqrt{r^2 + x^2} D \cos(\phi + \psi) P_r\right)^2 + \left(\sqrt{r^2 + x^2} D \sin(\phi + \psi) P_r\right)^2 = V_s^2 V_r^2 \cos^2 \phi \quad (3-23)$$

となり、 $V_r$  を求めると次式が得られる。

$$V_r = \sqrt{\frac{V_s^2 \cos \phi + \left(2\sqrt{r^2 + x^2} \cos(\phi + \psi)\right) D P_r + H}{2 \cos \phi}} \quad (3-24)$$

ここで、

$$H = \sqrt{\alpha + \beta + \chi}$$

$$\alpha = (V_s^2 \cos \phi)^2$$

$$\beta = \left(4\sqrt{r^2 + x^2} \cos(\phi + \psi) V_s^2 \cos \phi\right) D P_r$$

$$\chi = -(4(r^2 + x^2) \sin^2(\phi + \psi)) D^2 P_r^2$$

以上のように、PV 装置連系点電圧  $V_r$  の大きさを PV 装置からの出力電力  $P_r$  の関数として表すことが出来た。

### 3.6.2 力率 $\cos \phi$ 運転時における PV 装置から出力できる最大許容電力 $P_{r\max}$

式(3-24)において、 $H$  は実数でなければならない、すなわち、

$$\alpha + \beta + \chi > 0 \tag{3-25}$$

したがって、許容電力は以下の様に表現される。

$$0 < P_r < \frac{\cos(\psi + \phi) + 1}{2\sqrt{r^2 + x^2} D \sin^2(\psi + \phi)} V_s^2 \cos \phi \tag{3-26}$$

$H=0$  の時、出力電力は最大になる。したがって、最大許容電力  $P_{r\max}$  は、

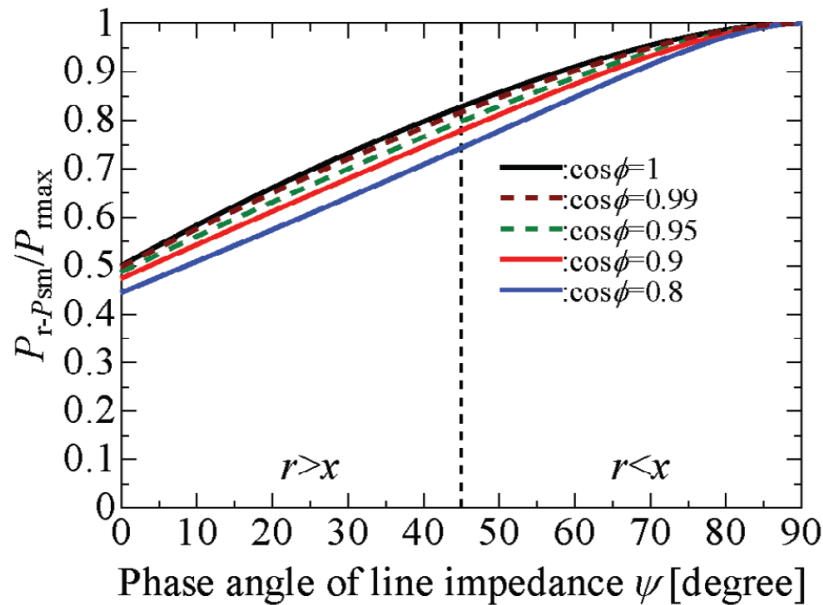


図 3-12  $P_{r-Psm}/P_{r\max}$  の線路インピーダンスの偏角  $\psi$  依存性

$$P_{r\max} = \frac{(\cos(\psi + \phi) + 1)V_s^2 \cos \phi}{2\sqrt{1 + (1/\tan \psi)^2 xD \sin^2(\psi + \phi)}} \quad (3-27)$$

である。

### 3.6.3 配電用変電所に流入する最大有効電力からみた PV 装置の最適な容量

式(3-21)に式(3-27)を代入すると、配電用変電所に流入する電力が最大になるときの PV 装置からの出力電力  $P_{r-Psm}$  の表式として次式が得られる。

$$P_{r-Psm} = \frac{\frac{(\cos(\psi + \phi) + 1)V_s^2 \cos \phi}{\sqrt{1 + (1/\tan \psi)^2 xD \sin^2(\psi + \phi)}} \tan\left(\frac{\psi + \phi}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) + \tan\left(\psi + \frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{4}\right)} \quad (3-28)$$

上式は、配電用変電所に届く有効電力を最大にしたいという観点から見て、PV 装置の最適な容量を与えと言え。この場合、式(3-16)に示しているように、配電用変電所に届けられる最大有効電力  $P_{s\max}$  は、次式で与えられる。

$$P_{s\max} = P_{r-Psm} \times \frac{\sin \phi + \tan \psi \cos \phi}{1 + \sin \phi + \tan \psi \cos \phi} \quad (3-29)$$

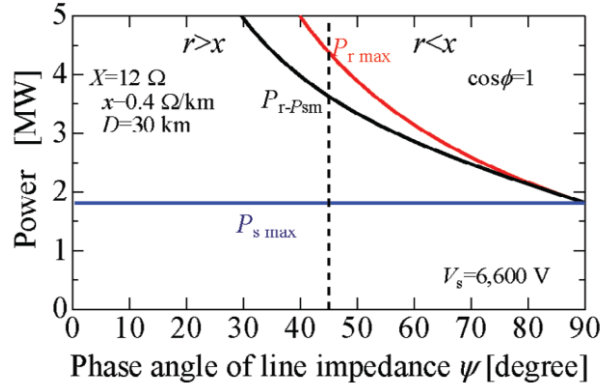
### 3.6.4 定量的検討

式(3-27)～式(3-29)において、配変送出電圧  $V_s$ 、線路リアクタンス  $X = xD$  と PV 装置の力率  $\cos \phi$  が与えられたとき、それぞれの有効電力は線路インピーダンスの偏角  $\psi$  の関数として表現された。ここでは、一例として、 $V_s = 6,600 \text{ V}$ 、 $X = 12 \Omega$  ( $x = 0.4 \Omega/\text{km}$ 、 $D = 30 \text{ km}$ )である場合を取り上げると、 $P_{r\max}$ 、 $P_{r-Psm}$  および  $P_{s\max}$  は、線路インピーダンスの偏角  $\psi$  の関数として、図 3-13 のように描かれる。また、 $r < x$  における  $P_{r\max}$ 、 $P_{r-Psm}$  および  $P_{s\max}$  の数値例を表 3-1 に示しておく。

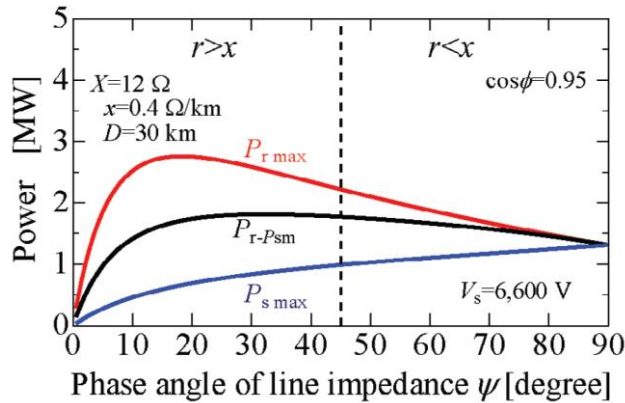
図 3-13 から次のことが分かる。

- (1) 抵抗  $r$  がゼロ (偏角  $\psi = 90^\circ$ ) のとき、線路損失は発生しないので、PV 装置から出力された電力はすべて配電用変電所に流入する。したがって、それぞれの力率において、 $P_{r\max}$ 、 $P_{r-Psm}$  および  $P_{s\max}$  は同じ大きさになっており、その大きさは力率角  $\phi$  が大きくなるほど、小さくなっている。

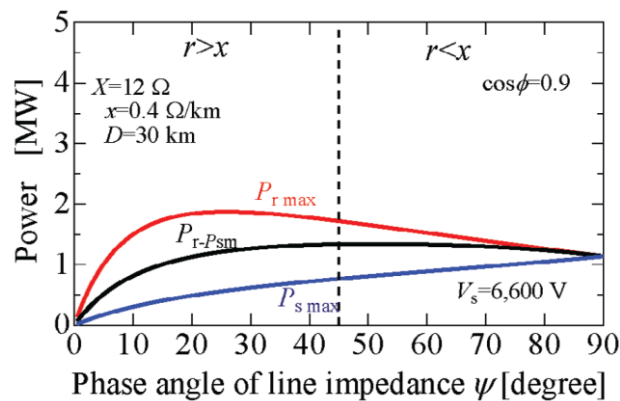
(2) 力率が1の場合には、 $P_{r\max}$ と $P_{r-Psm}$ は抵抗の増加(線路インピーダンスの偏角 $\psi$ の減少)に伴って大きく増加し、抵抗が無限大(偏角 $\psi=0$ )のとき両者は無限大になる。一方、 $P_{s\max}$ は



(a)  $\cos\phi=1$



(b)  $\cos\phi=0.95$



(c)  $\cos\phi=0.9$

図 3-13  $V_s=6,600$  V および  $X=12$  Ω ( $x=0.4$  Ω/km,  $D=30$  km) における  $P_{r\max}$ ,  $P_{r-Psm}$  および  $P_{s\max}$  の線路インピーダンスの偏角 $\psi$ 依存性  
(a) $\cos\phi=1$ , (b) $\cos\phi=0.95$ , (c) $\cos\phi=0.9$



3.2.5 項で説明したように抵抗の大きさに依存せず一定のままである。

- (3) 他方, PV 装置が進み力率 0.95 あるいは 0.90 で動作している場合を力率 1 の場合と比較すると,  $P_{rmax}$ ,  $P_{r-Psm}$  および  $P_{smax}$  の大小関係は同じであるが, 三つの電力の抵抗  $r$  (偏角  $\psi$ ) に対する特性は, 大きく異なっている。進み力率の場合, 抵抗が無限大 (偏角  $\psi=0$ ) のとき,  $P_{rmax} = P_{r-Psm} = P_{smax} = 0$  であり, 偏角の増加とともに,  $P_{smax}$  は単調増加しているが,  $P_{rmax}$  と  $P_{r-Psm}$  とは極大値を示す上に凸の特性を示している。

表 3-1 の数値例の一例として, 線路インピーダンス  $4.5+j12 \Omega$  ( $0.15+j0.4 \Omega/\text{km}$ , 30 km) の配電線路を取り上げる (表 3-1 の  $R = 4.5 \Omega$  の場合)。線路末端に連系された PV 装置が力率 1 で運転されている場合, PV 装置出力は最大 2.6 MW まで大きくできるが, 配電変電所に届く電力が最大値 1.82 MW になるときの PV 装置出力は 2.50 MW である。すなわち力率 1 で運転されている PV 装置の場合, この配電線路末端に導入する PV 装置の最適容量は 2.50 MW であると言える。それに対して, PV 装置が力率 0.9 で動作している場合には, 最大 0.98 MW が配電用変電所に流入する。この時の PV 装置出力は 1.30 MW である。力率 0.9 で運転している PV 装置がこの配電線路で 1.40 MW まで大きく出来るが, そこまで大きくすると配電用変電所に届く電力は低下してしまうので, この線路における最適な PV 装置の容量は 1.30 MW であると言える。

表 3-1  $V_s=6,600 \text{ V}$  および  $X=12 \Omega$  ( $x=0.4 \Omega/\text{km}$ ,  $D=30 \text{ km}$ ) における  $P_{rmax}$ ,  $P_{r-Psm}$  および  $P_{smax}$  の大きさ ( $R < X$ )

| Power factor | $R$ [ $\Omega$ ] | $\psi$ [ $^\circ$ ] | $P_{rmax}$ [MW] | $P_{r-Psm}$ [MW] | $P_{smax}$ [MW] |
|--------------|------------------|---------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 1            | 4.5              | 69                  | 2.62            | 2.50             | 1.82            |
|              | 9                | 53                  | 3.63            | 3.18             | 1.82            |
|              | 12               | 45                  | 4.38            | 3.63             | 1.82            |
| 0.95         | 4.5              | 69                  | 1.68            | 1.58             | 1.18            |
|              | 9                | 53                  | 2.03            | 1.72             | 1.07            |
|              | 12               | 45                  | 2.22            | 1.77             | 1.01            |
| 0.9          | 4.5              | 69                  | 1.40            | 1.30             | 0.98            |
|              | 9                | 53                  | 1.62            | 1.34             | 0.86            |
|              | 12               | 45                  | 1.72            | 1.34             | 0.79            |

### 3.7 おわりに

本章では、6.6 kV 配電系統の線路末端に大容量 PV 装置が連系された場合を取り上げ、PV 装置からの出力電力、配電用変電所に流入する電力および線路損失がベクトル図上の面積で相対的に表せることを、力率 1 運転時および進み力率運転時のそれぞれにおいて、明らかにした。また、PV 装置から出力される電力が最大になる場合および配電用変電所に流入する電力が最大になる場合を明らかにした。さらに、PV 装置の有効利用という観点から、PV 装置からの最大許容電力および配電用変電所に流入する電力の最大値の比率に関する線路インピーダンスの偏角依存性を検討した。その結果、負荷が配電用変電所近辺に集中して存在すると仮定した場合においては、配電用変電所に流入する有効電力が最大となるときの PV 装置からの出力電力が PV 装置を最も効率的に利用できる設備容量であるということを示せた。

## 第4章 高圧配電システムの末端に大容量 PV 装置が接続された場合の配電線路上の電圧分布

### 4.1 はじめに

前章までは、高圧配電システムの末端に大容量 PV 装置が接続された場合における PV 装置連系点電圧の逆潮流電流および PV 装置からの出力電力依存性に関して検討してきた。しかしながら、実際の配電システムでは、線路途中に自動電圧調整器 (SVR: Step Voltage Regulator) やサイリスタ式自動電圧調整器 (TVR: Thyristor type step Voltage Regulator) などの機器が設置され、需要家負荷電圧が法定電圧範囲を逸脱しないように、配電システムの電圧を制御している。このことから、大容量 PV 装置導入時において配電線路上の電圧を把握することは、重要であると考えられる。したがって、本章では、高圧配電システムの末端に大容量 PV 装置が接続された場合における配電線路上の電圧分布についてベクトル図を用いて検討を行った。

### 4.2 想定した配電システムモデル

図 4-1 に今回想定した線路末端に PV 装置が連系された配電システムモデルを示している。配変送出電圧を  $V_s$ 、PV 装置連系点における電圧を  $V_r$ 、配変から距離  $d$  離れた地点での電圧を  $V_d$  とする。また、配電用変電所から PV 装置連系点までの距離を  $D$ 、PV 装置からの逆潮流電流を  $I$ 、単位長さ当たりの線路インピーダンスを  $r+jx$  とする。したがって、線路全体のインピーダンスは  $(r+jx)D$  である。

### 4.3 電圧分布を表すベクトル図

図 4-2 は、線路末端に接続された PV 装置が力率 1 運転している場合について、逆潮流電流ベ

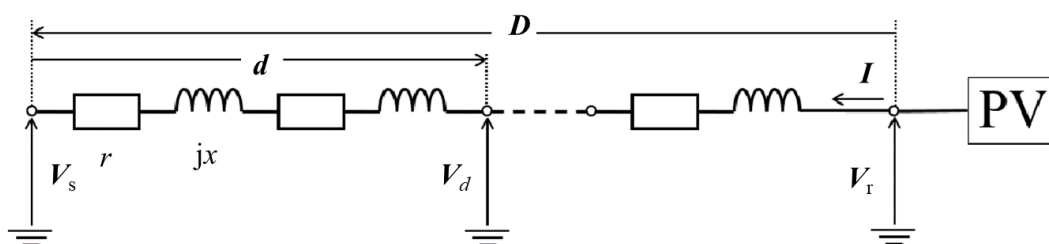


図 4-1 想定した配電システムの単相等価回路



ら、点 a における一点鎖線の接線である。すなわち、線路途中の電圧  $V_d$  の先端は、常に配変送出電圧の大きさを表している緑の一点鎖線より外側を通っている。上記より、PV 装置の動作点が点 a から点 p の間では、線路途中の電圧  $V_d$  の先端は、常に配変送出電圧の大きさを表している緑の一点鎖線より外側を通っており、配変からの距離  $d$  が増加するほど、電圧は上昇し続ける。

逆潮流電流がさらに増加し、PV 装置の動作点が点 p を超えた場合を図 4-4 に示している。動作点が点 c である場合の線分  $\overline{ac}$  に着目すると、線分  $\overline{ac}$  は、点 a 付近では緑の一点鎖線より内側を通っており、点 c 付近では緑の一点鎖線より外側を通っていることが確認できる。同図において、動作点が点 f である場合 ( $|V_f|=|V_s|$  となる場合) の  $\overline{af}$  に着目すると、線路途中の電圧  $V_d$  の先端は、点 f 以外では、常に緑の一点鎖線の内側を通っている。すなわち、動作点が点 p から点 f の間では、配変からの距離  $d$  が増加するに従って、線路途中の電圧  $V_d$  は配変送出電圧よりも低下していき極小値を示した後、増加に転じ、やがて配変送出電圧を上回る。

図 4-5 には、逆潮流電流の限界値である動作点 d まで移動した場合のベクトル図を示している。同図より、線分  $\overline{ad}$  は常に一点鎖線より内側を通っていることから、動作点が点 f を超えると、線路途中の電圧  $V_d$  は常に配変送出電圧よりも小さくなるのがわかる。

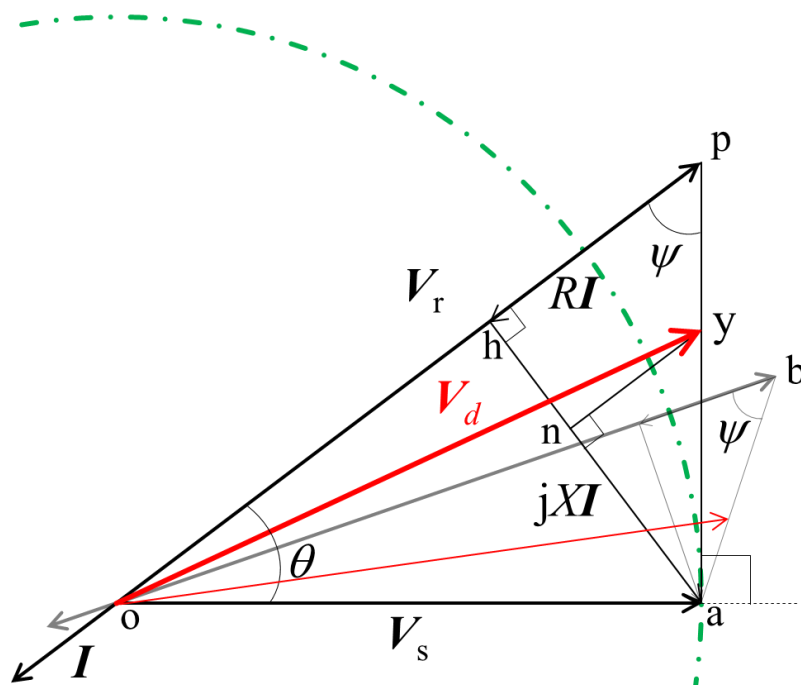


図 4-3 比較的小さい電流が流れた場合のベクトル図

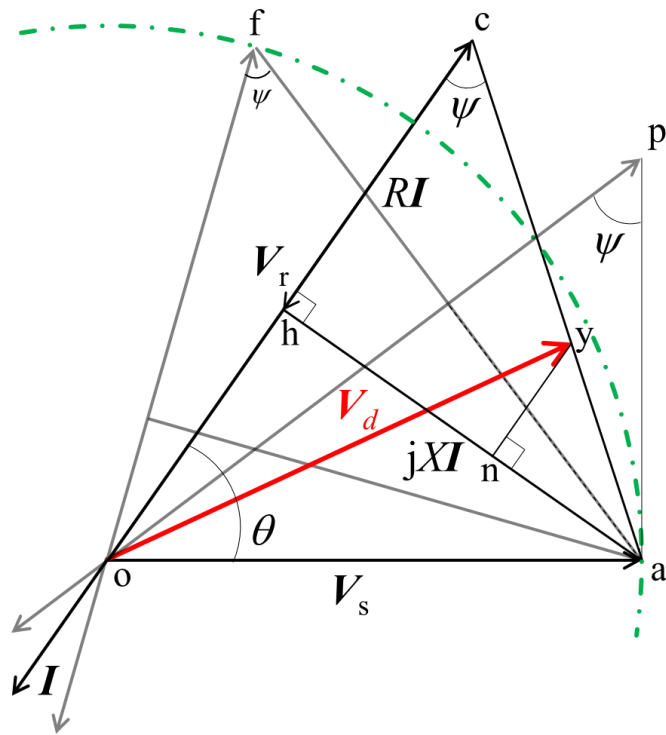


図 4-4 線路末端の電圧が最大になる場合から配変送電圧と同じになるまでの電流範囲におけるベクトル図

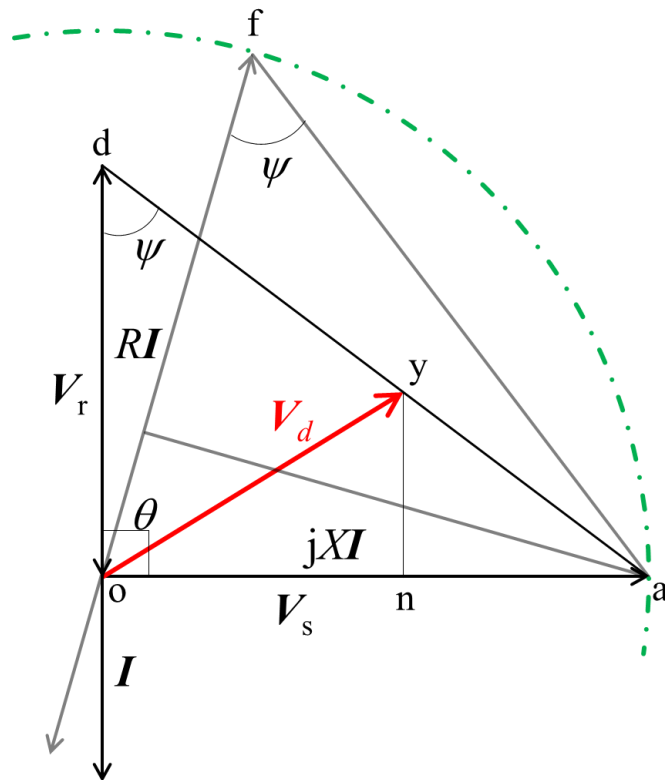


図 4-5 線路途中の電圧が常に配変電圧を下回る場合のベクトル図

#### 4.4 線路途中の電圧分布の表式

図 4-2 を例にとり、力率 1 運転時の線路途中の電圧  $V_d$  を求める。まず、点  $y$  から直線  $oa$  に向かって垂線を引き、その交点を点  $m$  とする。この直角三角形  $oym$  から線路途中の電圧を求めると次式で表される。

$$V_d = \overline{oy} = \sqrt{\overline{ym}^2 + \overline{mo}^2} = \sqrt{[zDI \sin(\theta + \psi)]^2 + [V_s + zDI \cos(\theta + \psi)]^2} \quad (4-1)$$

ただし、

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} \quad (4-2)$$

$$\tan \psi = (x/r) \quad (4-3)$$

$$\sin \theta = (xDI / V_s) \quad (4-4)$$

#### 4.5 電圧分布の逆潮流電流依存性に関する定量的検討

図 4-6 に、定量的な検討として、総線路長  $D$  が 25km、線路インピーダンス  $r+jx$  が  $0.3+j0.4 \Omega/\text{km}$  を想定した場合の線路途中の電圧分布に関して、線路末端に接続された PV 装置からの線電流  $I_L (= I/\sqrt{3})$  が 112 A, 229 A, 319 A, 341 A, 366 A, と 381 A である場合の計算結果を示している。

同図より、以下のことがわかる。

- (1)  $I_L$  が 112 A の場合、線路途中の電圧  $V_d$  は  $d$  にほぼ比例して増加している。
- (2)  $I_L$  が、PV 装置連系点電圧  $V_r$  が最大となる 229 A の場合、線路途中の電圧  $V_d$  は下に凸の波形を示している。しかしながら、線路途中の電圧  $V_d$  は常に配変送出電圧  $V_s$  よりも大きい。4.2 節で述べたように、 $I_L$  が 229 A 以下の場合であれば、 $V_d$  は常に  $V_s$  よりも大きくなる。
- (3)  $I_L$  が 229 A よりもさらに大きくなると、線路途中の電圧  $V_d$  は、下に凸の特性をより強く示す。また、 $d$  が小さい場合（配電用変電所付近）の電圧は 6.6 kV を下回る。
- (4)  $I_L$  が 319 A または 341 A である場合の線路途中の電圧  $V_d$  は、配電用変電所に近い場所では配変送出電圧より低い電圧となり、線路末端では高い電圧となる。
- (5)  $I_L$  が 366 A に到達すると、線路途中の電圧分布  $V_d$  は配変送出電圧  $V_s$  よりも常に小さくなる。
- (6)  $I_L$  が最大許容電流である 381 A に達すると、線路末端の電圧  $V_r$  および線路途中の電圧分布  $V_d$  は配変送出電圧  $V_s$  よりも常に小さくなる。

(7) 本想定(線路インピーダンス  $r+jx = 0.3+j0.4 \Omega/\text{km}$ , 線路長  $D = 25 \text{ km}$ )では, 送電できる最大許容電流である  $381 \text{ A}$  以上の逆潮流電流を流すことはできない。

#### 4.6 電圧分布の線路長依存性に関する定量的検討

電圧分布  $V_d$  の線路長  $D$  依存性に関して検討する。線路インピーダンスが  $0.3+j0.4 \Omega/\text{km}$  と  $0.15+j0.4 \Omega/\text{km}$  の二通りの場合を計算した。これは, 前者の線路に比べ, 後者の線路の方が導体断面積が大きいこと想定している。図 4-7 および図 4-8 には, 線路長  $D$  をパラメータにとって, 線路インピーダンス  $r+jx = 0.3+j0.4 \Omega/\text{km}$  の場合の電圧分布および  $r+jx = 0.15+j0.4 \Omega/\text{km}$  の場合をそれぞれ示している。また, 逆潮流線電流  $I_L$  は出力  $3 \text{ MW}$  時を想定して  $262 \text{ A}(=3 \times 10^6 / 6600\sqrt{3})$  と

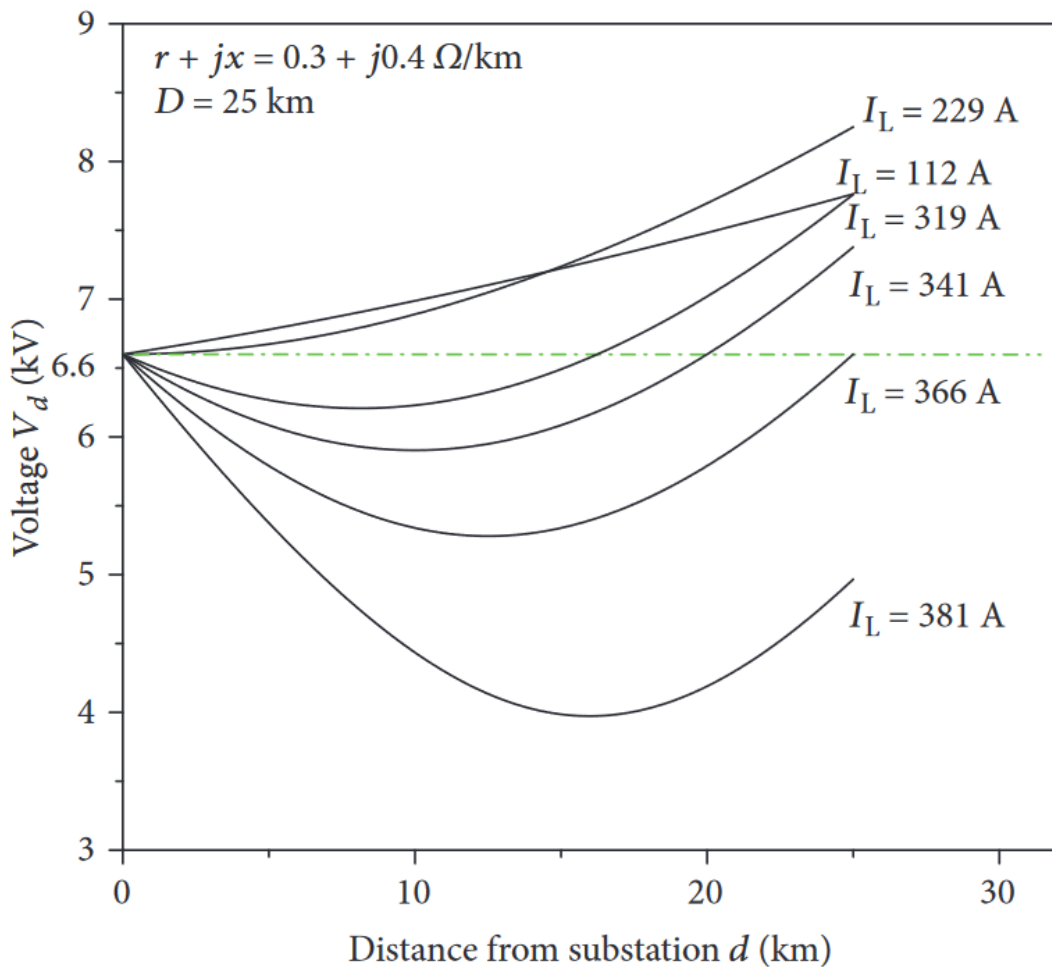


図 4-6 線路長  $D=25 \text{ km}$  の場合において線電流  $I_L$  をパラメータとした場合の線路電圧分



している。

同図より、以下のことがわかる。

- (1)  $D = 5 \text{ km}$  の場合には、線路途中の電圧  $V_d$  は  $d$  にほぼ比例して増加する。
- (2)  $D = 10 \text{ km}$  の場合には、線路途中の電圧  $V_d$  は下に凸の波形である。PV 装置連系点電圧  $V_r$  が最大となるのは、線路インピーダンス  $r+jx = 0.3+j0.4 \text{ } \Omega/\text{km}$  の場合では  $D = 21.8 \text{ km}$ 、 $0.15+j0.4 \text{ } \Omega/\text{km}$  の場合では  $D = 12.8 \text{ km}$  である。このとき、線路途中の電圧  $V_d$  は常に配変送出電圧  $V_s$  よりも大きくなる。
- (3)  $D$  が  $21.8 \text{ km}$  ( $r+jx = 0.3+j0.4 \text{ } \Omega/\text{km}$ ) もしくは  $12.8 \text{ km}$  ( $r+jx = 0.15+j0.4 \text{ } \Omega/\text{km}$ ) よりも大きくなると、線路途中の電圧  $V_d$  は配変電圧よりも低い領域と高い領域で構成される。

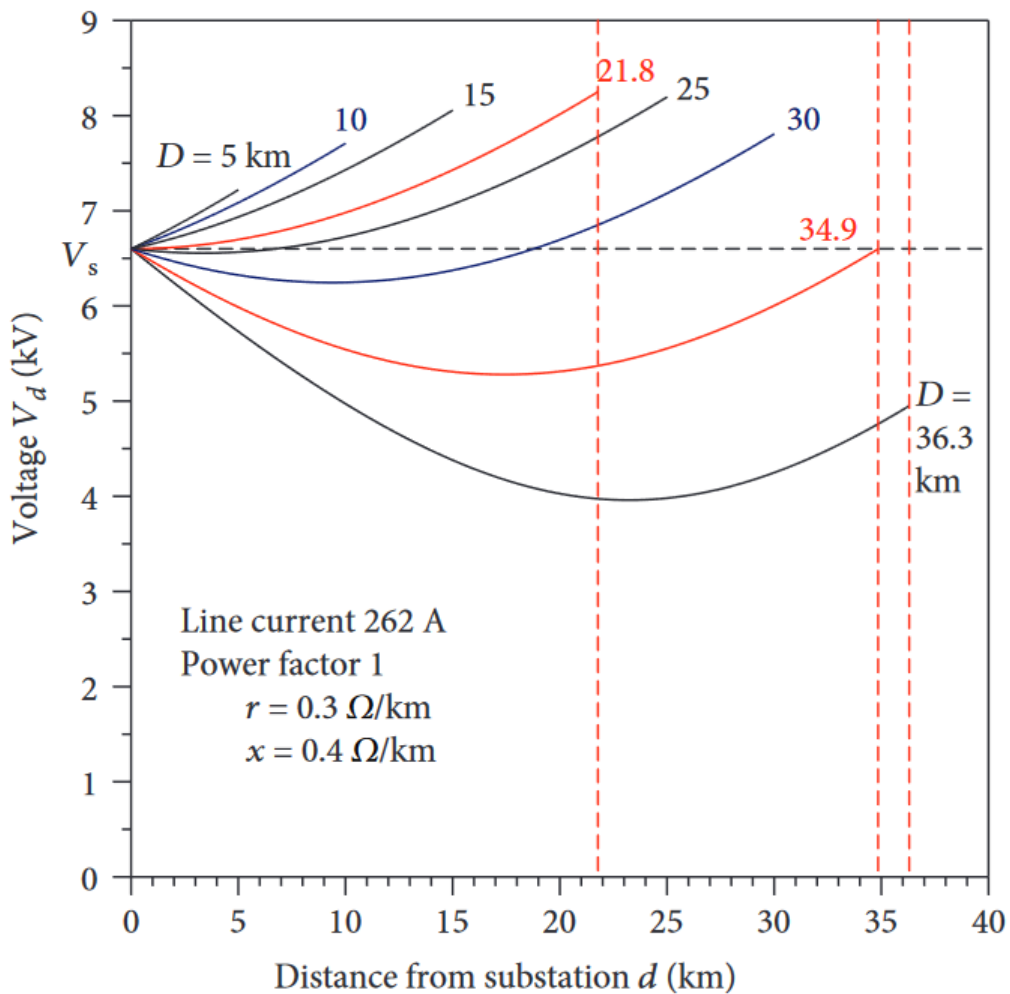


図 4-7 線電流が 262A(6.6 kV, 3 MW に相当)である場合の線路長をパラメータとして場合の電圧分布( $r+jx=0.3+j0.4 \text{ } \Omega/\text{km}$ )

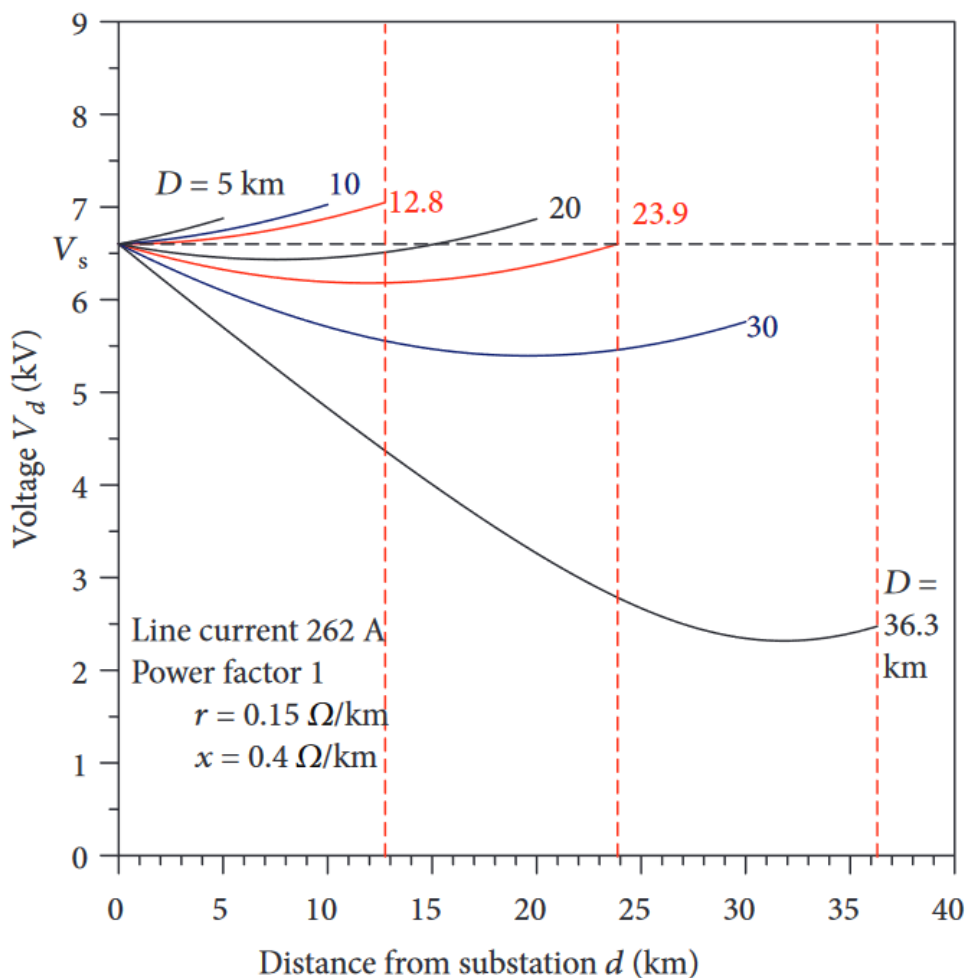


図 4-8 線電流が 262 A (6.6 kV, 3 MW に相当)である場合の線路長をパラメータとして場合の電圧分布( $r+jx=0.15+j0.4 \Omega/\text{km}$ )

- (4)  $D$  が 34.9 km ( $r+jx = 0.3+j0.4 \Omega/\text{km}$ ) もしくは 23.9 km ( $r+jx = 0.15+j0.4 \Omega/\text{km}$ ) に達すると、線路末端の電圧  $V_r$  は配変送出電圧  $V_s$  と等しくなる。この場合、線路途中の電圧  $V_d$  は常に  $V_s$  よりも小さくなる。
- (5)  $D$  が 34.9 km ( $r+jx = 0.3+j0.4 \Omega/\text{km}$ ) もしくは 23.9 km ( $r+jx = 0.15+j0.4 \Omega/\text{km}$ ) よりも大きくなると、線路末端の電圧  $V_r$  および線路途中の電圧  $V_d$  は、配変送出電圧  $V_s$  よりも常に小さくなる。
- (6)  $r+jx = 0.3+j0.4 \Omega/\text{km}$  および  $r+jx = 0.15+j0.4 \Omega/\text{km}$  のどちらの場合においても、線電流  $I_L$  が 262 A である場合の最大線路長  $D$  は 36.3 km であり、これより長い線路の場合では、安定して電力を送電できない。

## 4.7 電圧分布の出力有効電力依存性に関する定量的検討

図 4-9 および図 4-10 は PV 装置からの出力有効電力  $P_r$  をパラメータとした線路途中の電圧分布  $V_d$  の  $d$  依存性を表しており、前者は  $r+jx=0.3+j0.4 \Omega/\text{km}$  の場合、後者は  $r+jx=0.15+j0.4 \Omega/\text{km}$  の場合である。前者の線路においては、PV 装置からの出力有効電力の許容限界は 4.36 MW であるので図 4-9 には、1.50 MW, 3.27 MW, 4.28 MW, 4.36 MW の 4 ケースを描いている。

図 4-10 では、PV 装置の出力電力が 2.86 MW より大きいとき、PV 装置連系点電圧  $V_r$  と線路途中の電圧  $V_d$  は常に配変送出電圧  $V_s$  よりも小さくなる。この場合における PV 装置からの出力有効電力の許容限界は 3.14 MW であり、 $0.3+j0.4 \Omega/\text{km}$  の場合における出力電力の限界値より小さくなる。

これらの結果から、電線に太い線材を使用した場合には、PV 装置の出力電力に対する線路途中の電圧および PV 装置連系点電圧がより低下することが考えられる。

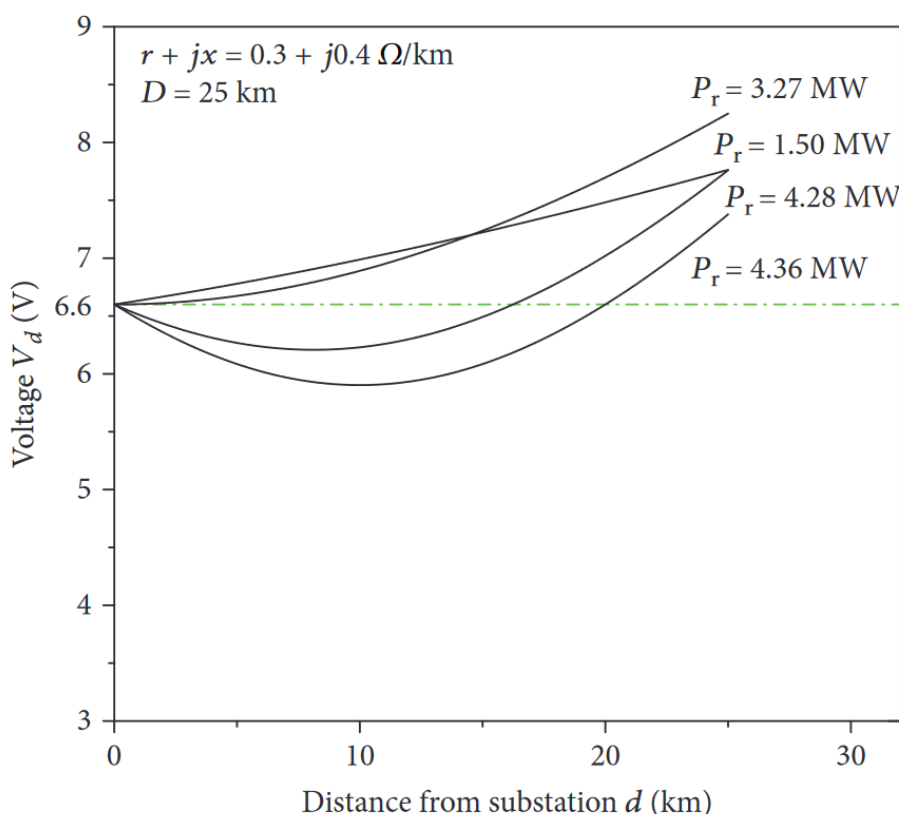


図 4-9 線路長  $D=25 \text{ km}$  の場合において PV 装置出力電力  $P_r$  をパラメータとした場合の線路電圧分布( $r+jx=0.3+j0.4 \Omega/\text{km}$ )

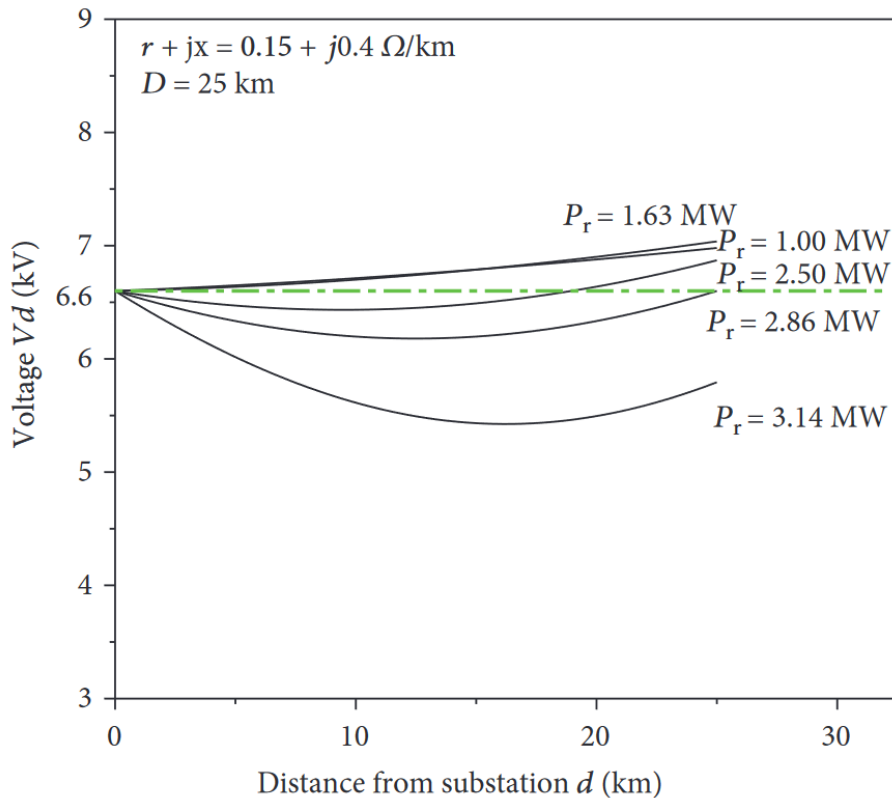


図 4-10 線路長  $D=25$  km の場合において PV 装置出力電力  $P_r$  をパラメータとした場合の線路電圧分布( $r+jx=0.15+j0.4 \Omega/\text{km}$ )

## 4.8 おわりに

本章では、6.6 kV 配電系統の線路末端に大容量 PV 装置が連系された場合を取り上げ、線路途中の電圧分布をベクトル図上で視覚的に検討できることを明らかにした。その結果、PV 装置からの出力電流の増加に伴って線路途中の電圧分布が下記のように変遷することが明らかになった。

- (1) PV 装置からの出力電流が小さい場合は、線路途中の電圧は、配電用変電所での送出し電圧(配変送出電圧)よりも高く、線路末端に行くにしたがって、単調に高くなる。
- (2) 上記(1)の特徴は、PV 装置出力電流が増加して、線路末端(PV 連系点)電圧が最大値を示すようになるまで、維持される。
- (3) PV 装置出力電流が、線路末端電圧が最大値を示す電流値以上に増加すると、配電用変電所の近くでは、その電圧が配変送出電圧より低くなり始め、下に凸の電圧分布を示すようになる。
- (4) PV 装置出力電流がさらに増加すると、配変送出電圧よりも低い領域が線路末端方向に広がる。

っていき、線路末端電圧が配変送出電圧より低下すると、線路途中の電圧は全て配変送出電圧より低くなるが、下に凸の特性は維持されている。

長距離配電系統に大容量 PV 装置が連系される場合には、以上の特徴を踏まえて、線路途中に設置される SVR や TVR などの制御アルゴリズムを再調整する必要があると考える。



## 第5章 PTFE 溶発蒸気が混入した高温 CO<sub>2</sub> ガスの絶縁特性

### 本章で利用する記号

|                         |   |
|-------------------------|---|
| $\alpha$                | 衝突電離係数 [m <sup>-1</sup> ]                               |
| $\eta$                  | 衝突電子付着係数 [m <sup>-1</sup> ]                             |
| $N$                     | 総粒子の数密度 [m <sup>-3</sup> ]                              |
| $\alpha/N$              | 換算衝突電離係数 [m <sup>2</sup> ]                              |
| $\eta/N$                | 換算電子付着係数 [m <sup>2</sup> ]                              |
| $E$                     | 電界 [Vm <sup>-1</sup> ]                                  |
| $j$                     | 粒子の種類   |
| $\mu$                   | 電子移動度 [m <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ] |
| $\tau_{j,\text{ion}}$   | 粒子 $j$ に対する電離衝突頻度 [s <sup>-1</sup> ]                    |
| $\tau_{j,\text{att}}$   | 粒子 $j$ に対する付着反応頻度 [s <sup>-1</sup> ]                    |
| $k_{j,\text{ion}}$      | 粒子 $j$ に対する電離反応係数 [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]     |
| $k_{j,\text{att}}$      | 粒子 $j$ に対する付着反応係数 [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]     |
| $n_j$                   | 粒子 $j$ に対する数密度 [m <sup>-3</sup> ]                       |
| $F_0(\varepsilon)$      | 電子エネルギー分布関数 (エネルギーの関数)                                  |
| $f$                     | 電子エネルギー分布関数 (空間座標, 速度, 時間の関数)                           |
| $\sigma_{j,\text{ion}}$ | 粒子 $j$ に対する電離衝突断面積 [m <sup>2</sup> ]                    |
| $\sigma_{j,\text{att}}$ | 粒子 $j$ に対する電子付着断面積 [m <sup>2</sup> ]                    |
| $m_e$                   | 電子質量 [kg]   |
| $e$                     | 電子素量 [C]  |
| $X_{\text{Abl}}$        | PTFE 溶発蒸気混入率  |
| $E/N$                   | 換算電界 [Td]   |
| $E_{\text{cr}}/N$       | 換算臨界電界 [Td]   |

### 5.1 はじめに

本章と第 6 章においては、地球環境に優しい電力システムの構築を目指して筆者が取り上げた二つ目の課題(高温 SF<sub>6</sub> 代替ガスの絶縁破壊特性の解明)に対する研究成果をまとめている。第一章で述べたように、SF<sub>6</sub> ガスはその高い絶縁・消弧性能から、ガス絶縁開閉装置 (GIS: Gas Insulated Switchgear) などの電力機器に広く使用されている。しかしながら、SF<sub>6</sub> ガスは、1997 年に京都で開催された COP3 において、CO<sub>2</sub> の 25,200 倍という高い地球温暖化係数から、削減すべき

対象のガスとして認定された。したがって、SF<sub>6</sub>に替わる消弧ガスを見つけだすことが喫緊の課題である。現在、SF<sub>6</sub>の代替ガスの最も有力な候補として、純粋 CO<sub>2</sub>もしくは CO<sub>2</sub>をベースにした混合ガスが提案されている<sup>[1]-[9]</sup>。本章においても、SF<sub>6</sub>ガスの代替ガスとして、CO<sub>2</sub>を取り上げている。

他方、電流遮断時には、非常に高温なアーク放電が発生するため、消弧室内においてガスの流れを制御しているノズル材料が溶発する。熱パuffァ式ガス遮断器では、この溶発蒸気を利用してガス圧力を高めることで遮断能力を向上させている<sup>[10]-[12]</sup>。一方で、ノズル材料が溶発した蒸気がアークへ混入すると絶縁・消弧ガスの特性が変化すると考えられる。しかしながら、ノズル材料の溶発蒸気が混入した CO<sub>2</sub>ガスに関する特性は明らかにされていない。そこで、本章では、ノズル材料としてフッ化樹脂である PTFE を想定し、アークによって溶発した PTFE 溶発蒸気が高温 CO<sub>2</sub>ガスへ混入した場合において、温度が徐々に低下し、粒子が再結合していく過程における絶縁破壊特性を明らかにしている。はじめに、高温ガスにおける換算臨界電界を算定するために必要な換算電離係数と換算付着係数の算出手法を説明した後に、PTFE 溶発蒸気が混入した高温 CO<sub>2</sub>ガスの換算臨界電界の算出結果を提示する。最後に、その結果から絶縁破壊に至る主たる粒子の衝突反応を明らかにする。

## 5.2 高温ガスにおける換算電離係数と換算付着係数の計算方法

絶縁破壊現象は、微視的には、電界下における電子と粒子の衝突反応で説明される。陰極から供給される電子が電界によって加速され、ガスを構成する粒子に衝突する。このとき、電子の衝突反応として、電離、付着、解離、励起などの反応が存在する。もし電離反応が付着反応を上回ったとき、電子雪崩が発生することで電子は指数関数的に増加し、電極間にストリーマが形成され、絶縁破壊に至る。すなわち、電離反応および付着反応は、衝突電離係数 $\alpha$ および衝突電子付着係数 $\eta$ を用いて表現され、 $\alpha > \eta$ のとき、絶縁破壊に至ると考えられる。この分野では、両係数を総粒子の数密度 $N$ で割ったものを換算係数と称して議論することが一般的である。そこで、本研究でもその慣習に従うこととする。

換算衝突電離係数 $\alpha/N$ と換算電子付着係数 $\eta/N$ は、下記のように表される<sup>[13]</sup>。

$$\frac{\alpha}{N} = \sum_j \left( \sum_{\text{ion}} \frac{\tau_{j,\text{ion}}/N}{(\mu N)(E/N)} \right) \quad (5-1)$$



$$\frac{\eta}{N} = \sum_j \left( \sum_{\text{att}} \frac{\tau_{j,\text{att}}/N}{(\mu N)(E/N)} \right) \quad (5-2)$$

ここで、 $E, N, j, \mu, \tau_{j,\text{ion}}$  および  $\tau_{j,\text{att}}$  は、それぞれ電界、全ての粒子の数密度、粒子の種類、電子移動度、粒子  $j$  における電離衝突頻度および付着反応頻度である。

衝突頻度は粒子  $j$  の数密度  $n_j$  と粒子  $j$  の反応係数  $k_j$  を用いて、

$$\tau_{j,\text{ion}} = k_{j,\text{ion}} n_j \quad (5-3)$$

$$\tau_{j,\text{att}} = k_{j,\text{att}} n_j \quad (5-4)$$

と表される。

加えて、粒子  $j$  に対する電離反応係数  $k_{j,\text{ion}}$  と付着反応係数  $k_{j,\text{att}}$  は、それぞれ

$$k_{j,\text{ion}} = \left( \frac{2e}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \int_0^{\infty} \varepsilon \sigma_{j,\text{ion}} F_0(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5-5)$$

$$k_{j,\text{att}} = \left( \frac{2e}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \int_0^{\infty} \varepsilon \sigma_{j,\text{att}} F_0(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5-6)$$

ここで、 $F_0(\varepsilon)$ 、 $\sigma_{j,\text{ion}}$ 、と  $\sigma_{j,\text{att}}$  は、それぞれ電子エネルギー分布関数(EEDF: Electron energy distribution function)、粒子  $j$  に対する電離衝突断面積と電子付着断面積である。

$k_j$  と EEDF の計算方法は、横水らの文献[14]および G.J.M. Hagelaar らの文献[15]に示されている。EEDF を求める際には、空間座標、速度、時間の関数である電子エネルギー分布関数  $f$  を用いて記述された Boltzmann 方程式を解く必要がある。文献[15]では、この方程式を解くとき、 $f$  を Legendre 多項式で展開し、第二項までを近似をして、エネルギーの関数である電子エネルギー分布関数  $F_0(\varepsilon)$  を求めている。

また、数密度  $n_j$  と衝突断面積  $\sigma_j$  は EEDF を計算するための基礎特性である。様々な温度における各粒子の数密度(粒子組成)は、横水らによって算定されたデータを利用した<sup>[16]</sup>。

衝突断面積に関して、文献調査により 18 種類の粒子の衝突断面積を取得した<sup>[17-30]</sup>。文献調査により明らかにできなかった 6 種類の粒子の衝突断面積は分子の剛体球モデルを想定して運動量移行断面積を算定した。

本研究では、電子の衝突に伴う衝突電離反応が電子付着反応を上回った時に絶縁破壊が発生すると想定し、計算により求めた換算付着係数と換算電離係数が等しくなるときの換算電界  $E/N$  を換算臨界電界  $E_{\text{cr}}/N$  として定義した。

### 5.3 PTFE 溶発蒸気が混入した高温 CO<sub>2</sub> ガスの粒子組成

本研究では、PTFE 溶発蒸気が混入した CO<sub>2</sub> ガスが、アーク放電によって、一度、30,000 K まで上昇し、その後、ガス圧力一定の状態です熱平衡状態を保ち、徐々に 300 K まで冷却していくと仮定している。PTFE 溶発蒸気が混入した CO<sub>2</sub> ガス中の粒子組成の温度依存性を求めるにあたり、表 5-1 に示すような 48 種類の粒子を想定した。加えて、本研究では、固相の炭素であるグラファイト C(s)が冷却途中に生成されることを考慮している。本研究では、既に開発されている 72 kV 級の CO<sub>2</sub> ガス遮断器のガス圧力である 0.8MPa-abs を想定した<sup>[5]</sup>。粒子組成は横水らが算定したデータを利用しており、具体的な計算方法は文献[16]に記載されている。粒子組成は本研究の主目的である換算臨界電界を計算するのに必要な基礎データであるため、本節で説明する。また、一般的に、4,000 K 以下が誘電的破壊領域であることが知られているため、本研究では、4,000 K 以下について図示している。

図 5-1 は、PTFE 溶発蒸気が混入していない場合の各粒子の数密度の温度依存性を 300 K-4,000 K の範囲で示している。同図より、本条件では、PTFE 溶発蒸気が混入していないため F を

表 5-1 PTFE 溶発蒸気が混入した高温 CO<sub>2</sub> ガスにおいて想定した粒子

| Phase                   | Chemical species   |
|-------------------------|--|
| Gaseous phase           |  |
| i) 26 neutral molecules |  |
|                         | CO <sub>2</sub> , CO, C <sub>2</sub> O, C <sub>3</sub> O <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>3</sub> , C <sub>4</sub> , C <sub>5</sub> , O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>  |
|                         | CF, CF <sub>2</sub> , CF <sub>3</sub> , CF <sub>4</sub> , CF <sub>3</sub> OF, C <sub>2</sub> F <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>  |
|                         | COF, COF <sub>2</sub> , F <sub>2</sub> , OF, OFO, FOF, FOO, FOOF   |
| ii) 3 atoms             |  |
|                         | C, F, O  |
| iii) 18 ions            |  |
|                         | CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , C <sup>+</sup> , C <sup>2+</sup> , C <sup>-</sup> , C <sub>2</sub> <sup>-</sup> , C <sub>2</sub> <sup>+</sup> , CF <sup>+</sup> , CF <sub>2</sub> <sup>+</sup> , CF <sub>3</sub> <sup>+</sup> |
|                         | F <sup>+</sup> , F <sup>2+</sup> , F <sup>-</sup> , F <sub>2</sub> <sup>+</sup> , O <sup>+</sup> , O <sup>2+</sup> , O <sup>-</sup> , O <sub>2</sub> <sup>-</sup> , O <sub>2</sub> <sup>+</sup>                              |
| iv) Electron            |  |
|                         | e  |
| Solid phase             |  |
|                         | C(s), i.e. graphite  |

含む粒子が存在しないことがわかる。また、温度が 300 K まで低下した時には、 $\text{CO}_2$  のみに戻ることが確認できる。

図 5-2 は、PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{\text{Abl}}=40\%$  の場合における各粒子の数密度の温度依存性を 300 K-4,000 K の範囲で示している。図 5-2(a)は C と O を含む粒子の数密度を示し、図 5-2(b)は F を含む粒子の数密度を示している。これらの図より、温度の低下によって、 $\text{CO}_2$  の数密度が増加していることが確認できる。これは、高温により解離した粒子が、温度の低下に伴い、再結合したためである。上述のように、図 5-2(a)の赤線で示すように、グラファイト  $\text{C(s)}$  が温度の低下に伴い生成されている。ここで、 $\text{C(s)}$  の数密度は、C の原子が気体全体に均一に分布しているとみなした見かけ上のものであって、グラファイトの実際の密度を表しているわけではない。

4,000 K の場合における、数密度の PTFE 蒸気混入率  $X_{\text{Abl}}$  依存性を、図 5-3 に示している。図 5-3(a)には、C と O を含む粒子の数密度を示し、図 5-3(b)は F を含む粒子の数密度を示している。同図より、PTFE 溶発蒸気混入率が増加するにしたがって、O を含む粒子が減少し、同図(a)において、 $X_{\text{Abl}}=100\%$  の場合では、O を含む粒子はゼロになっていることがわかる。

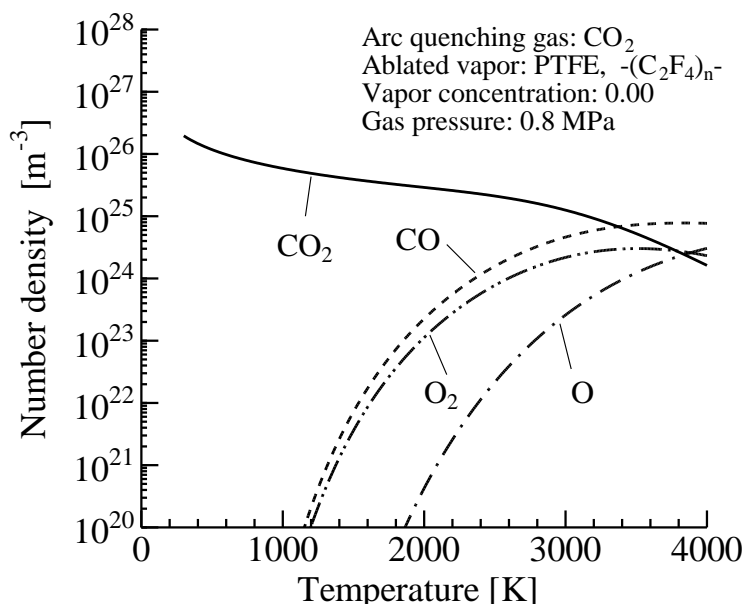


図 5-1 高温純粋  $\text{CO}_2$  ガスの 300 K から 4,000 K の粒子組成

## 5.4 電子衝突断面積

電子衝突断面積は、換算電離係数と換算付着係数を算定するための重要なデータの一つである。電子とガス粒子の衝突は、弾性、励起、電離、付着などの反応を引き起こす。これらの衝突反応は電子衝突断面積として表現される。表 5-2, および表 5-3 は衝突頻度  $\bar{\nu}$  に対応した衝突反応の種類とその表記法を示している。また、両表には各断面積の収集に利用した参考文献を示している

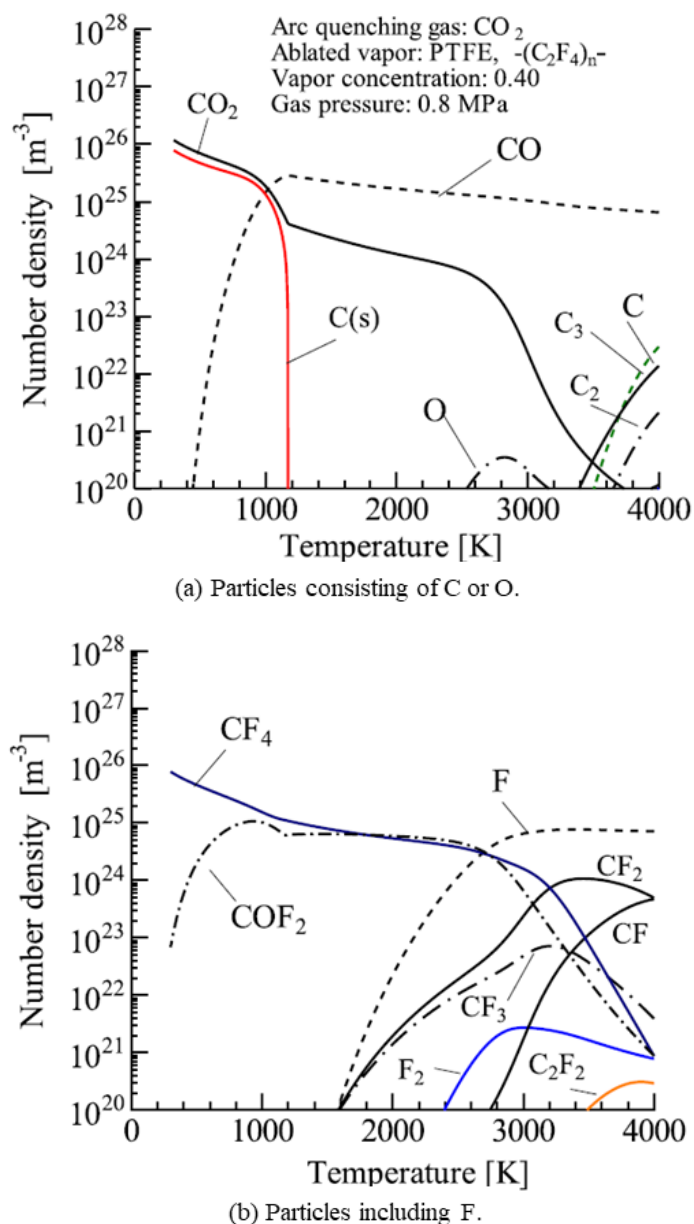


図 5-2 PTFE 溶発蒸が 40%混入した高温 CO<sub>2</sub> ガスの 300 K から 4,000 K の粒子組成

る。

本研究では、24 種類の衝突断面積を採用した。その中の 18 種類については、文献調査により収集した<sup>[17-30]</sup>。これら以外の粒子において、比較的多く存在する  $C_4$ ,  $C_5$ ,  $C_2O$ ,  $C_3O_2$ ,  $COF$ ,  $OF$  の 6 種類の衝突断面積に関しては、分子の剛体球モデルと Van der Waals 半径をもとに運動量移行断面積を求めた。

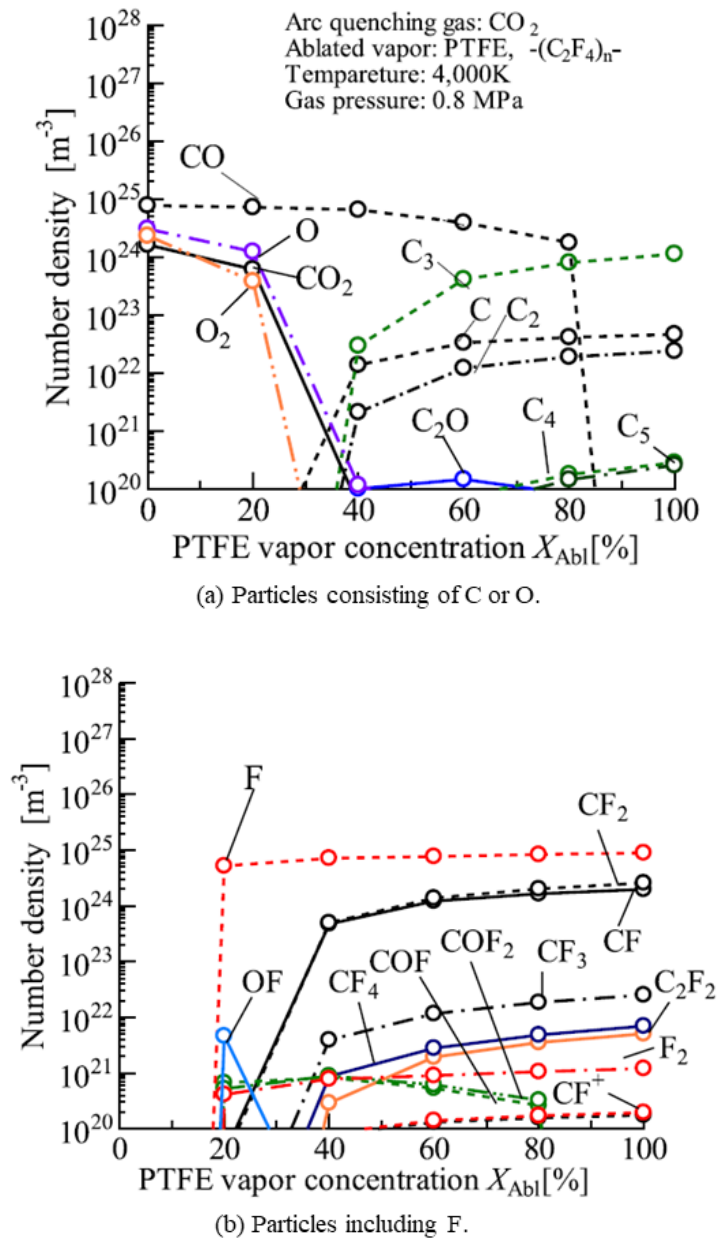


図 5-3 ガス温度 4,000 K における粒子組成の PTFE 溶発蒸気混入率依存性

## 5.5 換算臨界電界の推定

### 5.5.1 換算臨界電界の推定手順

本研究では、0.8 MPa において、PTFE 溶発蒸気が混入した CO<sub>2</sub> ガスの換算臨界電界  $E_{cr}/N$  を数値計算により求めた。これまでに述べたような粒子組成や衝突断面積をもとに、PTFE 溶発蒸気混入率をパラメータとして、換算衝突電離係数や換算電子付着係数を算定した。各ガス温度、各 PTFE 溶発蒸気混入率において、換算衝突電離係数  $\alpha/N$  と換算電子付着係数  $\eta/N$  が等しくなる換算電界を求め、それを換算臨界電界とした。

### 5.5.2 1,000 K における換算衝突電離係数と換算電子付着係数

図 5-4 は換算衝突電離係数  $\alpha/N$  と換算電子付着係数  $\eta/N$  の換算電界  $E/N$  依存性を 1,000 K の場合に関して描いている。PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{Abl}$  をパラメータに取っており、 $X_{Abl}=0\%$ , 20%, 40% の場合をそれぞれ黒線、赤線、青線 ( $\alpha/N$  は破線、 $\eta/N$  は実線) で示している。同図において、換算衝突電離係数  $\alpha/N$  と換算電子付着係数  $\eta/N$  の交点を円印でマークしており、その点における

表 5-2 採用した衝突電離反応と電子付着反応の種類とその表記法  
(F を含まない粒子の反応)

| Type of collision reaction | Collision reaction                      | Notation of collision frequency | Reference number |
|----------------------------|---|---------------------------------|------------------|
| Ionization                 | $C + e \rightarrow C^+ + 2e$            | $\tau_{C,ion}$                  | [19]             |
| Ionization                 | $C_2 + e \rightarrow C_2^+ + 2e$        | $\tau_{C2,ion}$                 | [21]             |
| Ionization                 | $C_3 + e \rightarrow C_3^+ + 2e$        | $\tau_{C3,ion}$                 | [21]             |
| Ionization                 | $CO + e \rightarrow CO^+ + 2e$          | $\tau_{CO,ion}$                 | [17]             |
| Ionization                 | $CO_2 + e \rightarrow CO_2^+ + 2e$      | $\tau_{CO2,ion}$                | [17]             |
| Dissociative attachment    | $CO_2 + e \rightarrow CO + O^-$         | $\tau_{CO2,d-att}$              | [17]             |
| Ionization                 | $O + e \rightarrow O^+ + 2e$            | $\tau_{O,ion}$                  | [19]             |
| Ionization                 | $O_2 + e \rightarrow O_2^+ + 2e$        | $\tau_{O2,ion}$                 | [18]             |
| Attachment                 | $O_2 + O_2 + e \rightarrow O_2^- + O_2$ | $\tau_{O2,att}$                 | [18]             |
| Dissociative attachment    | $O_2 + e \rightarrow O^- + O$           | $\tau_{O2,d-att}$               | [18]             |
| Ionization                 | $O_3 + e \rightarrow O_3^+ + 2e$        | $\tau_{O3,ion}$                 | [20]             |
| Dissociative attachment    | $O_3 + e \rightarrow O_2^- + O$         | $\tau_{O3,d-att-1}$             | [20]             |
| Dissociative attachment    | $O_3 + e \rightarrow O_2 + O^-$         | $\tau_{O3,d-att-2}$             | [20]             |

鉛直な線を一点鎖線で描いている。これらの横軸の値が換算臨界電界  $E_{cr}/N$  であり,  $X_{Ab1}=0\%$ , 20%, 40%の場合, それぞれ  $E_{cr}/N=87$  Td, 113 Td, 129 Tdと読み取れる。ここで, Td(タウンゼント)

表 5-3 採用した衝突電離反応と電子付着反応の種類とその表記法  
(F を含む粒子の反応)

| Type of collision reaction | Collision reaction                          | Notation of collision frequency | Reference number |
|----------------------------|---|---------------------------------|------------------|
| Ionization                 | $C_2F_2 + e \rightarrow C_2F_2^+ + 2e$      | $\tau_{C2F2, ion}$              | [27]             |
| Dissociative attachment    | $C_2F_2 + e \rightarrow C_2 + F + F^-$      | $\tau_{C2F2, d-att}$            | [27]             |
| Ionization                 | $C_2F_4 + e \rightarrow C_2F_4^+ + 2e$      | $\tau_{C2F4, ion-1}$            | [25]             |
| Ionization                 | $C_2F_4 + e \rightarrow C_2F_3^+ + F + 2e$  | $\tau_{C2F4, ion-2}$            | [25]             |
| Ionization                 | $C_2F_4 + e \rightarrow CF_3 + CF^+ + 2e$   | $\tau_{C2F4, ion-3}$            | [25]             |
| Ionization                 | $C_2F_6 + e \rightarrow CF_3 + CF_3^+ + 2e$ | $\tau_{C2F6, ion-1}$            | [26]             |
| Ionization                 | $C_2F_6 + e \rightarrow C_2F_5^+ + F + 2e$  | $\tau_{C2F6, ion-2}$            | [26]             |
| Ionization                 | $C_2F_6 + e \rightarrow CF_5 + CF^+ + 2e$   | $\tau_{C2F6, ion-3}$            | [26]             |
| Ionization                 | $C_2F_6 + e \rightarrow CF_4 + CF_2^+ + 2e$ | $\tau_{C2F6, ion-4}$            | [26]             |
| Dissociative attachment    | $C_2F_6 + e \rightarrow C_2F_5 + F^-$       | $\tau_{C2F6, d-att-1}$          | [26]             |
| Dissociative attachment    | $C_2F_6 + e \rightarrow CF_3^- + CF_3$      | $\tau_{C2F6, d-att-2}$          | [26]             |
| Ionization                 | $CF + e \rightarrow CF^+ + 2e$              | $\tau_{CF, ion}$                | [23]             |
| Dissociative attachment    | $CF + e \rightarrow C + F^-$                | $\tau_{CF, d-att}$              | [22]             |
| Ionization                 | $CF_2 + e \rightarrow CF_2^+ + 2e$          | $\tau_{CF2, ion}$               | [23]             |
| Dissociative attachment    | $CF_2 + e \rightarrow CF + F^-$             | $\tau_{CF2, d-att}$             | [22]             |
| Ionization                 | $CF_3 + e \rightarrow CF_3^+ + 2e$          | $\tau_{CF3, ion}$               | [23]             |
| Ionization                 | $CF_4 + e \rightarrow CF_2^{2+} + 2F + 3e$  | $\tau_{CF4, ion-1}$             | [24]             |
| Ionization                 | $CF_4 + e \rightarrow CF_3^+ + F + 2e$      | $\tau_{CF4, ion-2}$             | [24]             |
| Ionization                 | $CF_4 + e \rightarrow CF_3^{2+} + F + 3e$   | $\tau_{CF4, ion-3}$             | [24]             |
| Ionization                 | $CF_4 + e \rightarrow CF_2^+ + 2F + 2e$     | $\tau_{CF4, ion-4}$             | [24]             |
| Ionization                 | $CF_4 + e \rightarrow CF^+ + 3F + 2e$       | $\tau_{CF4, ion-5}$             | [24]             |
| Ionization                 | $CF_4 + e \rightarrow C^+ + 4F + 2e$        | $\tau_{CF4, ion-6}$             | [24]             |
| Ionization                 | $CF_4 + e \rightarrow CF_3 + F^+ + 2e$      | $\tau_{CF4, ion-7}$             | [24]             |
| Dissociative attachment    | $CF_4 + e \rightarrow CF_3 + F^-$           | $\tau_{CF4, d-att-1}$           | [24]             |
| Dissociative attachment    | $CF_4 + e \rightarrow CF_3^- + F$           | $\tau_{CF4, d-att-2}$           | [24]             |
| Ionization                 | $F + e \rightarrow F^+ + 2e$                | $\tau_{F, ion-1}$               | [28]             |
| Ionization                 | $F + e \rightarrow F^+ + 2e$                | $\tau_{F, ion-2}$               | [28]             |
| Ionization                 | $F + e \rightarrow F^+ + 2e$                | $\tau_{F, ion-3}$               | [28]             |
| Attachment                 | $F + e \rightarrow F^-$                     | $\tau_{F, att}$                 | [29]             |
| Ionization                 | $F_2 + e \rightarrow F_2^+ + 2e$            | $\tau_{F2, ion}$                | [27]             |
| Dissociative attachment    | $F_2 + e \rightarrow F + F^-$               | $\tau_{F2, d-att}$              | [27]             |
| Ionization                 | $COF_2 + e \rightarrow COF_2^+ + 2e$        | $\tau_{COF2, ion}$              | [30]             |

は換算電界の単位として一般的に用いられており、 $1 \text{ Td} = 1 \times 10^{-21} \text{ V m}^2$  である。

ガス温度が  $1,000 \text{ K}$  の場合、PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{\text{Abl}}$  が増加すると、換算電子付着係数  $\eta/N$  はわずかに増加する。例えば、 $X_{\text{Abl}}$  が  $0\%$  から  $20\%$  に増加すると、 $\eta/N$  は  $E/N=100 \text{ Td}$  付近で約  $1.3$  倍になる。 $\alpha/N$  に関しては、 $X_{\text{Abl}}$  が  $0\%$  から  $20\%$  に増加すると、 $E/N=100 \text{ Td}$  付近で約  $1/3$  倍に減少する。しかしながら、 $X_{\text{Abl}}$  が  $20\%$  から  $40\%$  に増加した場合には、 $\alpha/N$  はほとんど変化せずに  $\eta/N$  のみ増加する。したがって、換算臨界電界  $E_{\text{cr}}/N$  は上昇する。なお、 $1,000 \text{ K}$  において、 $E_{\text{cr}}/N$  が最も小さいのは  $87 \text{ Td}$  で、 $X_{\text{Abl}}$  が  $0\%$  (すなわち純粋  $\text{CO}_2$  ガス) の場合である。また、 $\eta/N$  は  $E/N$  に対してほぼフラットな特性を持っており、 $\alpha/N$  は  $E/N$  に対して急激に増加していることが確認できる。

### 5.5.3 4,000 K における換算衝突電離係数と換算電子付着係数

図 5-5 には、ガス温度が  $4,000 \text{ K}$  の場合における換算衝突電離係数  $\alpha/N$  と換算電子付着係数  $\eta/N$  の換算電界  $E/N$  依存性を描いている。PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{\text{Abl}}$  は、 $0\%$ 、 $20\%$ 、 $40\%$  である。ガス温度  $4,000 \text{ K}$  で  $X_{\text{Abl}}=0\%$ 、 $20\%$ 、 $40\%$  の場合、それぞれ  $E_{\text{cr}}/N=107 \text{ Td}$ 、 $75 \text{ Td}$ 、 $153 \text{ Td}$  と読み取れる。

同図において、 $X_{\text{Abl}}$  が  $20\%$  の場合の換算電子付着係数  $\eta/N$  は  $X_{\text{Abl}}$  が  $0\%$  の場合よりも小さくな

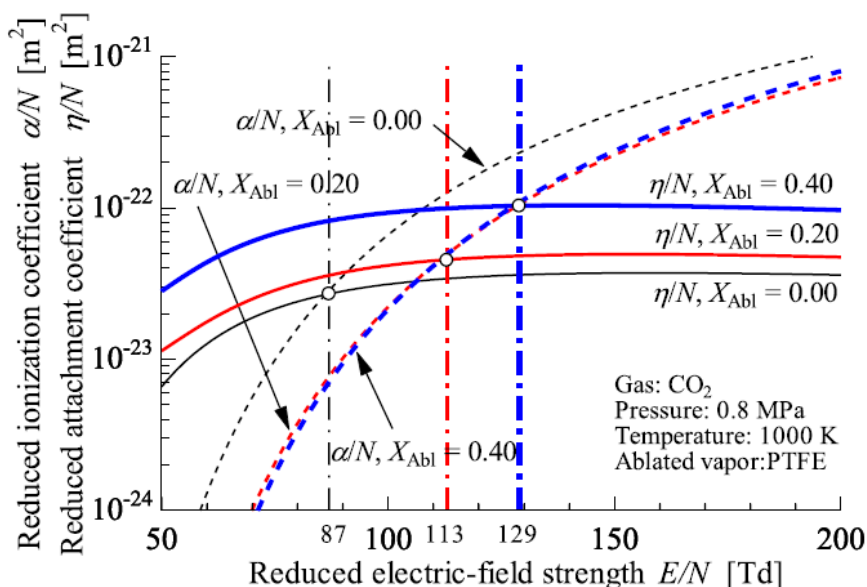


図 5-4 ガス温度  $1,000 \text{ K}$  における換算電離係数と換算付着係数の換算電界依存性 ( $X_{\text{Abl}}=0\%$ 、 $20\%$ 、 $40\%$ )



っている。一方で、 $X_{Abl}$  が 40% の場合における  $\eta/N$  は、 $X_{Abl}$  が 0% の場合よりも大きくなっている。例えば、 $X_{Abl}$  が 0% から 20% に増加した場合には、 $\eta/N$  は 90 Td 付近で約 1/3 倍に減少しており、 $X_{Abl}$  が 20% から 40% に増加した場合には、 $\eta/N$  は 110 Td 付近で約 93 倍に増加している。他方で、換算衝突電離係数  $\alpha/N$  は  $X_{Abl}$  の増加に伴い、増加している。この場合において  $E_{cr}/N$  が最も小さくなるのは 75 Td であり、 $X_{Abl}$  が 20% の場合である。このような  $\eta/N$  や  $\alpha/N$  の低下・増加のメカニズムは各粒子の衝突反応を用いて説明でき、詳細は後述の 5.6 節で分析する。

### 5.5.4 換算臨界電界の推定結果

図 5-6 と図 5-7 は PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{Abl}$  が 0% (純粋 CO<sub>2</sub> ガス), 20%, 40%, 60%, 80%, 100% の場合の換算臨界電界  $E_{cr}/N$  の推定結果を 300 K から 4,000 K の範囲で示している。図 5-6 は、 $E_{cr}/N$  の温度依存性を、図 5-7 は  $E_{cr}/N$  の PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{Abl}$  依存性を示している。これらの図から以下のことが言える。

#### 1. $X_{Abl}=0%$ (純粋 CO<sub>2</sub> ガス) の場合

図 5-6 において、2,000 K 以下であればガス温度に関係なく、換算臨界電界  $E_{cr}/N$  は 87 Td を示している。しかしながら、3,000 K から 4,000 K では、 $E_{cr}/N$  は、約 110 Td を示しており 2,000 K 以下の場合よりも大きい。これは、図 5-1 における粒子組成が、約 2,000 K 以下では CO<sub>2</sub> のみ

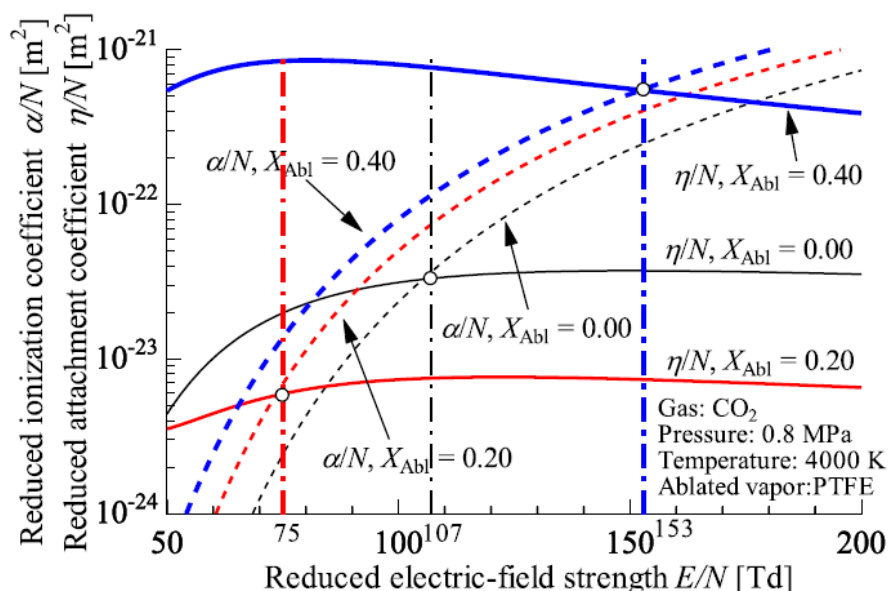


図 5-5 ガス温度 4,000 K における換算電離係数と換算付着係数の換算電界依存性 ( $X_{Abl}=0\%, 20\%, 40\%$ )

が主要な粒子となるためである。

## 2. 換算臨界電界 $E_{cr}/N$ の PTFE 溶発蒸気依存性

(1) 図 5-6 および図 5-7 より、高温  $\text{CO}_2$  ガスへ PTFE 溶発蒸気が混入した場合には、その混入率の増加に伴い、換算臨界電界  $E_{cr}/N$  は上昇する傾向が見られる。特に、2,000 K 以下

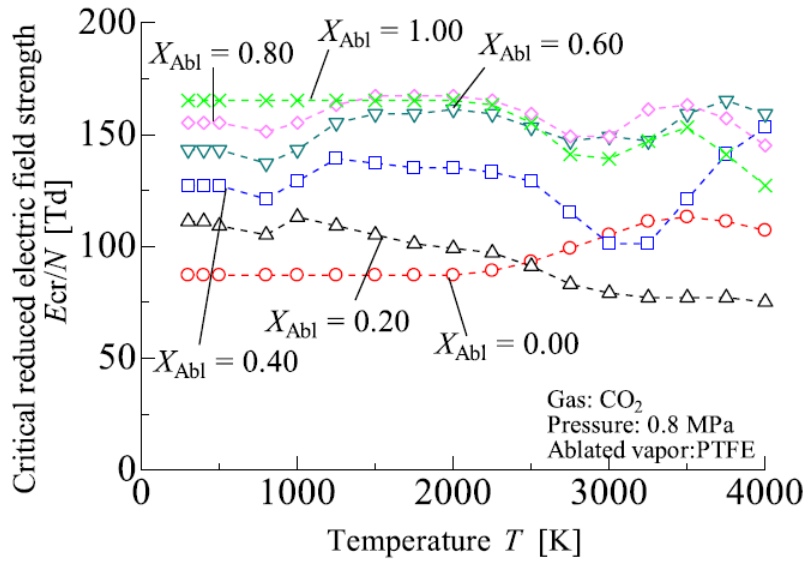


図 5-6 換算臨界電界のガス温度依存性  
( $X_{Abl}=0\%$ ,  $20\%$ ,  $40\%$ ,  $60\%$ ,  $80\%$ ,  $100\%$ )

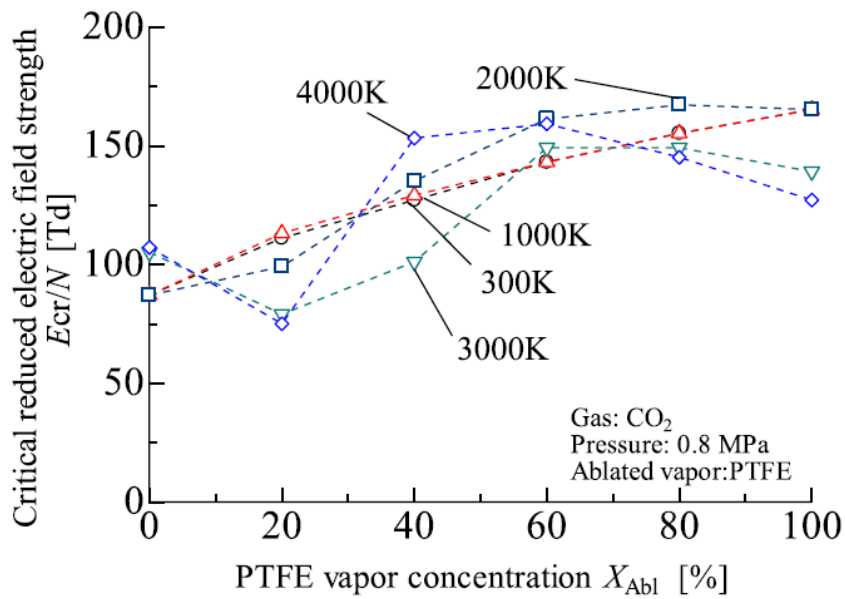


図 5-7 換算臨界電界の PTFE 溶発蒸気混入率依存性  
(ガス温度=300 K, 1,000 K, 2,000 K, 3,000 K, 4,000 K)

でこの傾向が顕著である。例を挙げると、 $X_{\text{Abl}}=40\%$ の場合には、2,000 K 以下では、 $E_{\text{cr}}/N$  は約 130 Td であり、これは、純粋  $\text{CO}_2$  ガスの場合と比較して、1.5 倍大きくなっている。

(2)  $X_{\text{Abl}}$  が 60%以上である場合の換算臨界電界  $E_{\text{cr}}/N$  は、純粋  $\text{CO}_2$  の  $E_{\text{cr}}/N$  と比較して、300 K から 4,000 K の全範囲で大きくなる。例えば、2,000 K において、 $X_{\text{Abl}}$  が 100%の場合には、 $E_{\text{cr}}/N$  は約 165 Td である。これは、純粋  $\text{CO}_2$  ガスの場合の約 1.9 倍である。一般的に、フッ素化合物は大きな電子付着効果があることが知られているため、図 5-3 に示すように、PTFE 溶発蒸気の混入量が増加するほど、CF や  $\text{CF}_2$ 、 $\text{CF}_4$  などのフッ素化合物の数密度が増加しており、このことから換算臨界電界が増加していると考えられる。

(3) 3,000 K から 4,000 K の範囲において、 $X_{\text{Abl}}$  が 20%と 40%の場合には、換算臨界電界  $E_{\text{cr}}/N$  が純粋  $\text{CO}_2$  ガスの  $E_{\text{cr}}/N$  よりも小さくなる場合がある。たとえば、 $X_{\text{Abl}}=20\%$ 、4,000 K の場合では、 $E_{\text{cr}}/N$  はおよそ 75 Td である。これは、純粋  $\text{CO}_2$  ガスの場合と比較して約 2/3 倍に小さくなっている。また、 $X_{\text{Abl}}=40\%$ 、3,000 K の場合では、 $E_{\text{cr}}/N$  は 99 Td であり、純粋  $\text{CO}_2$  の 105 Td よりもわずかに小さい。一方で、同混入率 4,000 K では、急激に増加し 153 Td となる。この理由は、各粒子の衝突反応を用いて説明でき、詳細は 5.6 節で分析している。

### 3. 換算臨界電界 $E_{\text{cr}}/N$ のガス温度依存性

#### (1) PTFE 溶発蒸気混入率 $X_{\text{Abl}}=20\%$ :

図 5-6 に示すように、換算臨界電界  $E_{\text{cr}}/N$  はガス温度が上昇するにつれて、低下していく。2,500 K 以上では、純粋  $\text{CO}_2$  ガスの  $E_{\text{cr}}/N$  を下回る。1,000 K における  $E_{\text{cr}}/N$  は 113 Td であり、純粋  $\text{CO}_2$  ガスの  $E_{\text{cr}}/N$  (87 Td) よりも大きい。しかしながら、4,000 K においては、 $E_{\text{cr}}/N$  は 75 Td と純粋  $\text{CO}_2$  ガスの  $E_{\text{cr}}/N$  (107 Td) よりも小さい。

#### (2) PTFE 溶発蒸気混入率 $X_{\text{Abl}}=40\%$ :

最も小さい換算臨界電界  $E_{\text{cr}}/N$  は、3,000 K 付近の 100 Td である。これは、純粋  $\text{CO}_2$  の  $E_{\text{cr}}/N$  (106 Td) よりも小さい。一方で、温度が 3,000 K から 4,000 K に増加すると、 $X_{\text{Abl}}=20\%$  の場合と異なり、 $E_{\text{cr}}/N$  は増加していく。

## 5.5.5 推定結果の妥当性

ここでは、本研究で算定した換算臨界電界の妥当性を検討する。しかしながら、電流遮断過程におけるガス遮断器内部の複雑な過渡状態における換算臨界電界を実験結果から求めた報告はない。そこで、これまでの報告で算定された換算臨界電界と比較を行った。Hao Sun らは文献[7]に

において、純粋 CO<sub>2</sub> ガスのガス圧力が 0.01 MPa, 0.1 MPa, 0.5 MPa, 1.0 MPa の場合における換算臨界電界  $E_{cr}/N$  を計算している。図 5-8 では、文献[7]から参照した 0.5 MPa と 1.0 MPa の場合における純粋 CO<sub>2</sub> ガスの  $E_{cr}/N$  をそれぞれ赤の点線と青の一点鎖線で描いている。同図からは  $E_{cr}/N$  のガス圧力依存性はほとんどないことが確認できる。

図 5-8 には、本研究で推定したガス圧力 0.8 MPa の場合における  $E_{cr}/N$  もまた白円で同時に描いている。Hao Sun らが計算により求めた  $E_{cr}/N$  と比較すると、ほぼ同じ特性となっていることが確認できる。

## 5.6 換算臨界電界へ寄与する主たる衝突反応

本節では、これまでに述べた PTFE 溶発蒸気混入に伴う換算臨界電界  $E_{cr}/N$  の増加に関して、換算臨界電界へ寄与している主要な衝突反応を分析する。

### 5.6.1 ガス温度 1,000 K における主たる衝突反応

電子と粒子間の衝突反応の頻度を表している衝突頻度  $\nu$  は、どの衝突反応が換算臨界電界  $E_{cr}/N$  に大きな影響を与えているパラメータの一つである。

図 5-9 は、PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{Abl}=0\%$  (純粋 CO<sub>2</sub> ガス) における換算衝突頻度  $\nu/N$  の換算電界  $E/N$  依存性を示している。図 5-4 に示したように、この場合における換算臨界電界  $E_{cr}/N$  は

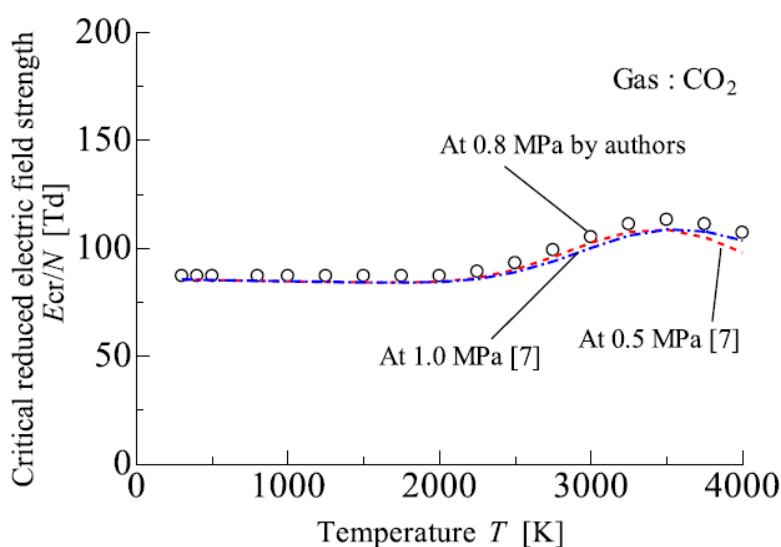


図 5-8 本研究で算定した純粋 CO<sub>2</sub> の換算臨界電界と公表されている文献の値<sup>[7]</sup>との比較

87 Td である。そのため、図 5-9 の  $E/N=87$  Td 付近をみると、電離反応としては  $\text{CO}_2(\tau_{\text{CO}_2,\text{ion}})$ が、付着反応としては  $\text{CO}_2(\tau_{\text{CO}_2,\text{d-att}})$ が主要な衝突反応となっていることがわかる。

図 5-10 は、PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{\text{Abl}}=20\%$ の場合における、換算衝突頻度  $\tau/N$  の換算電界  $E/N$  依存性を示している。図 5-4 に示したように、この場合における換算臨界電界  $E_{\text{cr}}/N$  は 113 Td である。図 5-10 における、113 Td 付近をみると、主要な電離反応としては  $\text{CO}_2(\tau_{\text{CO}_2,\text{ion}})$ と  $\text{CO}(\tau_{\text{CO},\text{ion}})$ であることがわかる。一方で、最も主要な付着反応としては、 $\text{CF}_4(\tau_{\text{CF}_4,\text{d-att-1}})$ と  $\text{CO}_2(\tau_{\text{CO}_2,\text{d-att}})$ である。

図 5-11 は、PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{\text{Abl}}=40\%$ の場合における、換算衝突頻度  $\tau/N$  の換算電界  $E/N$  依存性を示している。この時の、換算臨界電界  $E_{\text{cr}}/N$  は、129 Td である。同図より、129 Td 付近を見ると、主要な電離反応は、 $\text{CO}_2(\tau_{\text{CO}_2,\text{ion}})$ 、 $\text{CO}(\tau_{\text{CO},\text{ion}})$ 、 $\text{CF}_4(\tau_{\text{CF}_4,\text{ion-2}})$ である。一方で、付着反応として主要な反応は、 $\text{CF}_4(\tau_{\text{CF}_4,\text{d-att-1}})$ 、 $\text{CO}_2(\tau_{\text{CO}_2,\text{d-att}})$ 、 $\text{CF}_4(\tau_{\text{CF}_4,\text{d-att-2}})$ である。

図 5-4 において、PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{\text{Abl}}$  が 0%から 20%に増加すると、換算電離係数  $\alpha/N$  が減少している。これは、 $\text{CO}_2$  の換算衝突頻度  $\tau/N$  が減少していることが最も影響していることがわかる。しかしながら、PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{\text{Abl}}$  が 20%から 40%に増加しても、 $\text{CO}_2$  の電離反応の衝突頻度  $\tau/N$  はほぼ変化しない。これは、式(5-3)における反応係数  $k_{\text{CO}_2,\text{ion}}$  が増加し、 $\text{CO}_2$  の数分率が減少したためである。

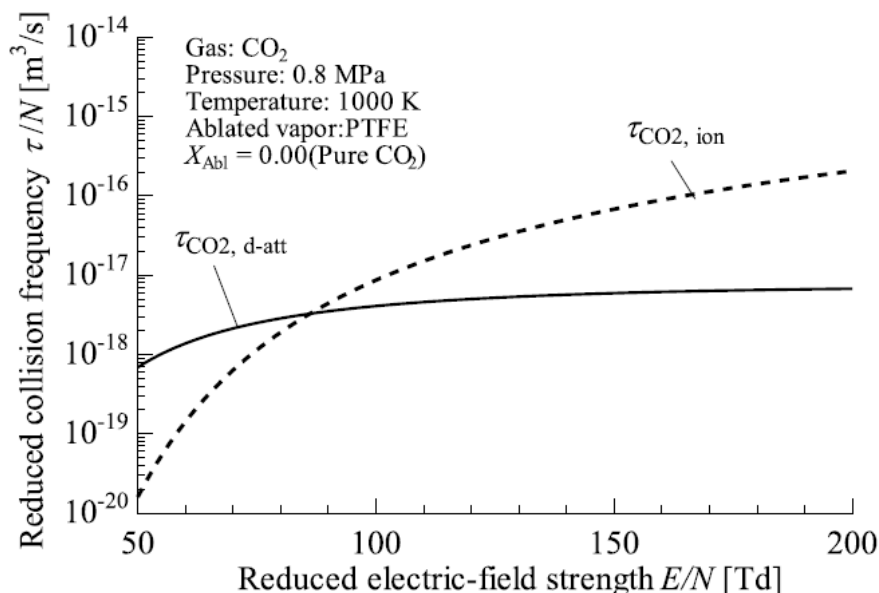


図 5-9 1,000 K の純粋  $\text{CO}_2$  ガスにおける衝突頻度の換算電界依存性

付着反応に関して、図 5-9 から図 5-11 より、換算付着係数  $\eta/N$  に影響を与える主要な粒子は、純粋  $\text{CO}_2$  ガスの場合では、 $\text{CO}_2$  であり、PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{\text{Abl}}$  が 20%、40% の場合には、 $\text{CF}_4$  であることがわかる。さらに、図 5-4 より、換算付着係数  $\eta/N$  は PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{\text{Abl}}$  が 0% から 40% まで増加するにしたがって、増加し続ける。これは、 $\text{CF}_4$  の付着断面積が  $\text{CO}_2$  よりも大きい

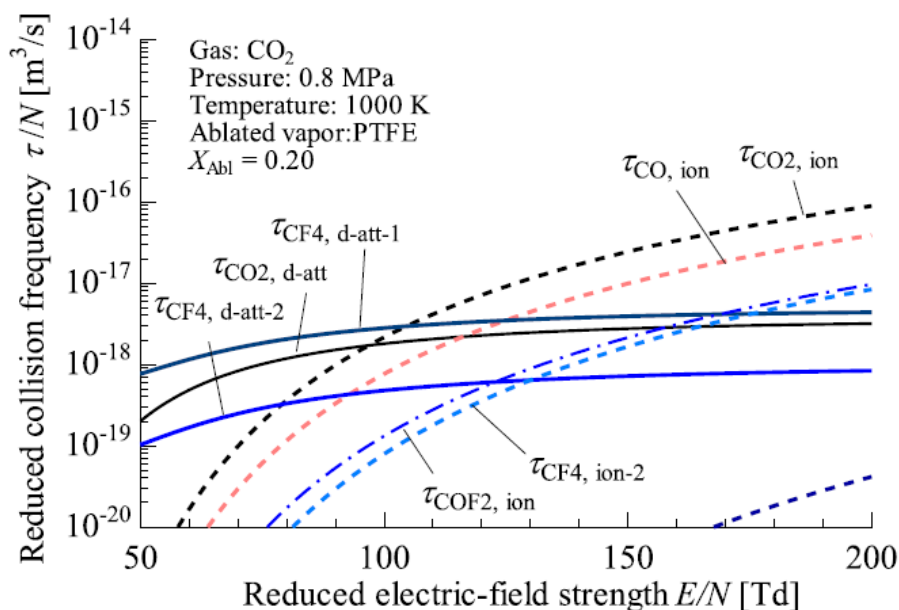


図 5-10 1,000 K および PTFE 溶発蒸気混入率 20% における衝突頻度の換算電界依存性

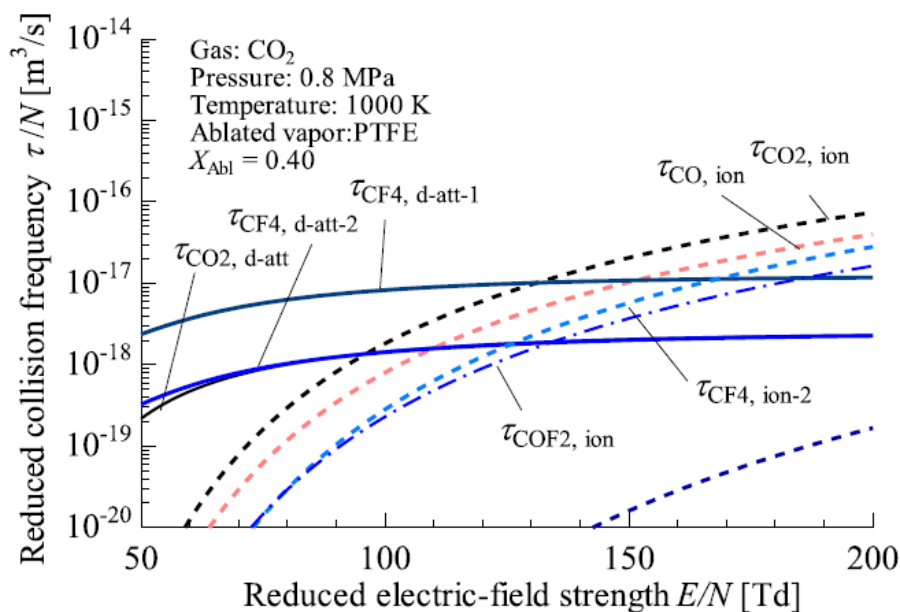


図 5-11 1,000 K および PTFE 溶発蒸気混入率 40% における衝突頻度の換算電界依存性

めであり、20%から40%にかけては、CF<sub>4</sub>の数も増加しているためである。

### 5.6.2 ガス温度 4,000 K における主たる衝突反応

図 5-12 は、ガス温度が 4,000 K、PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{Abl}$  が 0% (純粋 CO<sub>2</sub> ガス) の場合における換算衝突頻度  $\tau/N$  の換算電界依  $E/N$  依存性を示している。図 5-5 より、この場合における換算臨界電界  $E_{cr}/N$  は、107 Td である。図 5-12 から分かるように、107 Td 付近で主要な反応は CO ( $\tau_{CO,ion}$ ) や O ( $\tau_{O,ion}$ )、O<sub>2</sub> ( $\tau_{O2,ion}$ ) の電離反応と、O<sub>2</sub> ( $\tau_{O2,d-att}$ ) の付着反応である。

図 5-13 は、PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{Abl}$  が 20% の場合の換算衝突頻度  $\tau/N$  の換算電界依  $E/N$  依存性を示している。この場合における換算臨界電界  $E_{cr}/N$  は図 5-5 に示すように 75 Td である。図 5-13 から求められるように、75 Td 付近の主要な反応は、CO ( $\tau_{CO,ion}$ ) と O ( $\tau_{O,ion}$ ) の電離反応と O<sub>2</sub> ( $\tau_{O2,d-att}$ ) と CO<sub>2</sub> ( $\tau_{CO2,d-att}$ )、F<sub>2</sub> ( $\tau_{F2,d-att}$ ) の付着反応である。

図 5-14 は、PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{Abl}$  が 40% の場合の換算衝突頻度  $\tau/N$  の換算電界依  $E/N$  依存性を示している。このときの換算臨界電界  $E_{cr}/N$  である 153 Td 付近において主要な反応は、CO ( $\tau_{CO,ion}$ ) の電離反応と CF ( $\tau_{CF,d-att}$ ) の付着反応である。

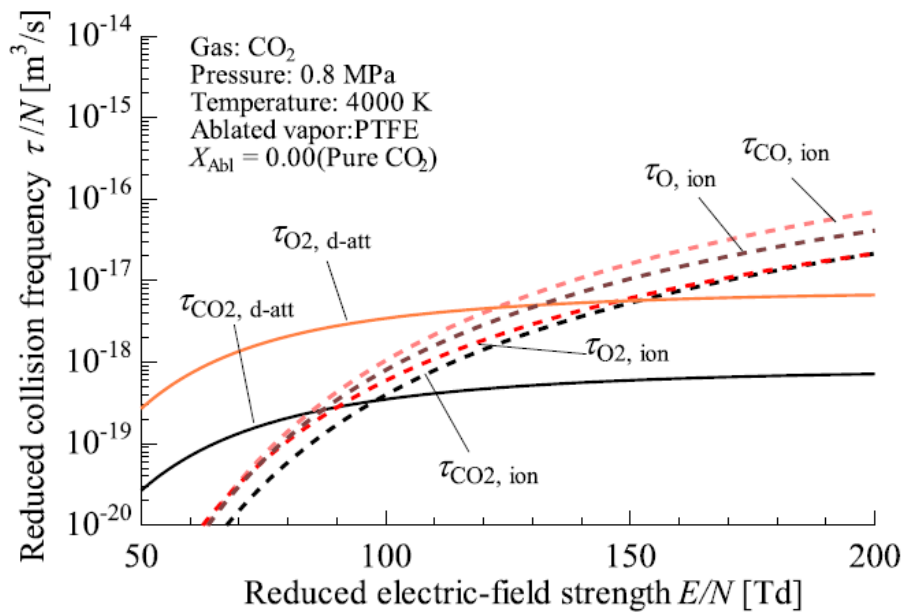


図 5-12 4,000 K の純粋 CO<sub>2</sub> ガスにおける衝突頻度の換算電界依存性

1,000 K において最も主要な反応は  $\text{CO}_2$  であったが、4,000 K において最も主要な反応は  $\text{CO}$  である。4,000 K において  $\text{CO}$  の換算電離衝突頻度は PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{\text{Abl}}$  の増加に伴って単調に増加する。すなわち、換算衝突電離係数  $\alpha/N$  の変化の傾向が 1,000 K と 4,000 K とで異なるのは、換算電離係数に寄与している主要な電離反応が異なるためであることがわかる。

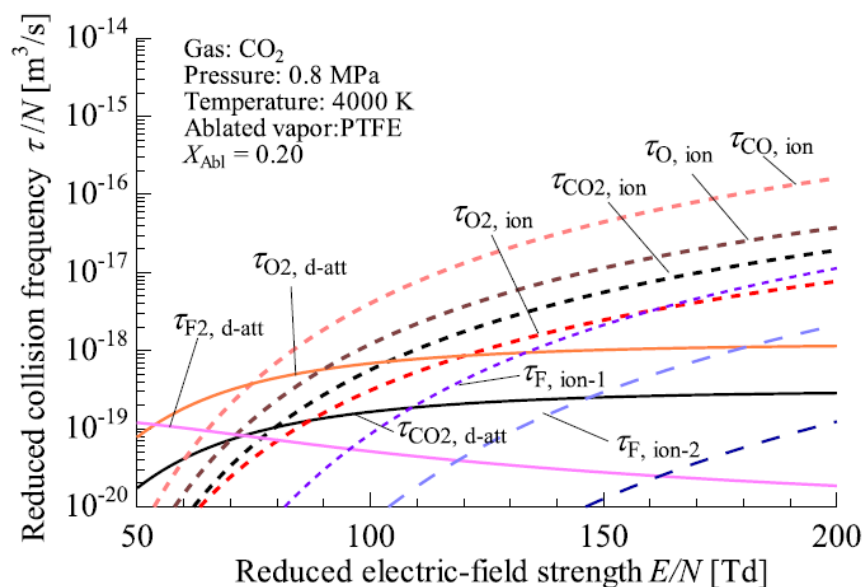


図 5-13 4,000 K および PTFE 溶発蒸気混入率 20%における衝突頻度の換算電界依存性

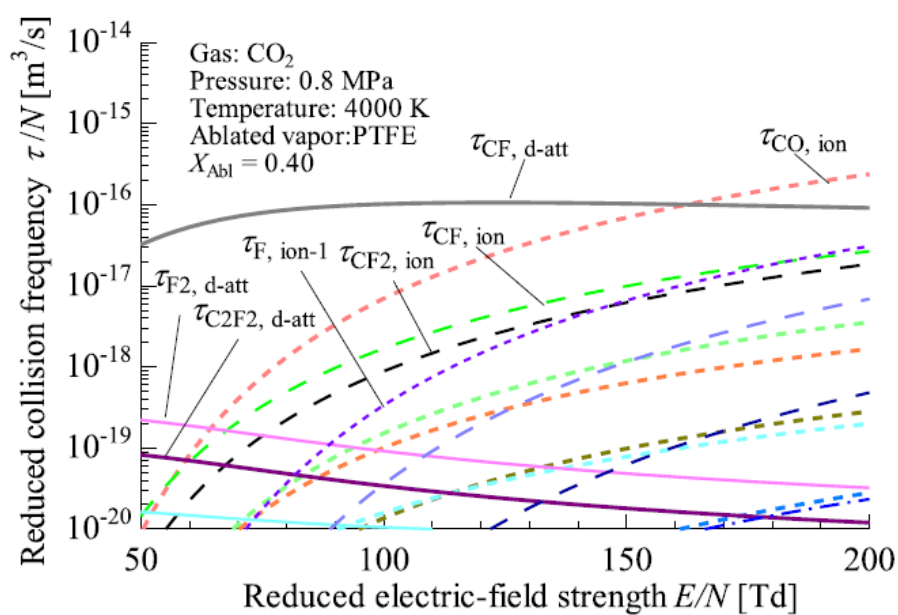


図 5-14 4,000 K および PTFE 溶発蒸気混入率 40%における衝突頻度の換算電界依存性



図 5-6 と図 5-7 において換算臨界電界が純粋 CO<sub>2</sub> の場合よりも下回る条件である 4,000 K の場合(すなわち図 5-5 の条件)における換算電子付着係数  $\eta/N$  の増加・減少の傾向は以下のように説明される。

- $X_{\text{Abl}}=0\%$ (純粋 CO<sub>2</sub> ガス)および  $X_{\text{Abl}}=20\%$  の場合において、換算付着衝突頻度に影響を与える最も主要な反応は O<sub>2</sub> ( $\tau_{\text{O}_2,\text{d-att}}$ ) である。
- $X_{\text{Abl}}=40\%$  では、主要な反応が CF ( $\tau_{\text{CF},\text{d-att}}$ ) に変化する。
- O<sub>2</sub> の換算衝突頻度  $\tau_{\text{O}_2,\text{d-att}}$  は  $X_{\text{Abl}}$  が 0% から 20% へ増加するに伴って減少するが、最も主要な反応のままである。
- $X_{\text{Abl}}$  がさらに増加して 40% になると、CF の換算衝突頻度  $\tau_{\text{CF},\text{d-att}}$  が急激に増加し、最も主要な反応となる。

上述の結果として、換算付着係数  $\eta/N$  は  $X_{\text{Abl}}$  が 0% から 20% に変化した際には減少し、20% から 40% まで増加した際には増加している。これに対応して、換算臨界電界も同様の傾向を示している。

## 5.7 各温度および各 PTFE 溶発蒸気混入率におけるガスを構成する支配的な粒子

各温度および各 PTFE 溶発蒸気混入率における主要な衝突反応を、表 5-4 と表 5-5 にまとめた。前者には主要な電離反応を、後者には主要な付着反応をそれぞれまとめている。さらに、表 5-6 には、各 PTFE 溶発蒸気混入率において、4,000K から温度が低下していく際のガスを構成する支配的な粒子をまとめている。表 5-4 から表 5-6 をみると、各温度および各 PTFE 溶発蒸気混入率において、主要な反応の多くはガスを構成する支配的な粒子から導かれていることがわかる。対照的に、付着反応においては、主要な反応と支配的な粒子とは関係がないという多くの例外が存在する。例を挙げると、PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{\text{Abl}}=40\%$  の場合において、支配的な粒子は CO<sub>2</sub> と CO であるにも関わらず、主要な付着反応は CF<sub>4</sub> ( $\tau_{\text{CF}_4,\text{d-att-1}}$ ) である。これは、CF<sub>4</sub> の付着断面積は CO<sub>2</sub> よりも大きく、CO は付着断面積を持っていないためである<sup>[17][24]</sup>。

5.5.4 節で説明したように、PTFE 溶発蒸気混入率  $X_{\text{Abl}}=60\%$  を超えるような場合における換算臨界電界  $E_{\text{cr}}/N$  は純粋 CO<sub>2</sub> ガスの  $E_{\text{cr}}/N$  より大きくなることが期待できる。この場合のガスを構成する主要な粒子は表 5-6 より、CF<sub>4</sub> である。大きな付着断面積を持つ CF<sub>4</sub> の粒子数密度が大きくなることで、 $E_{\text{cr}}/N$  は上昇する<sup>[22][24]</sup>。

以上より、主要な反応の多くは、ガスを構成する支配的な粒子もしくは大きな付着断面積を持った粒子によっていることが明らかとなった。

表 5-4 異なる温度および異なる PTFE 混入率における主要な電離反応

| Temperature $T$ [K] | PTFE concentration rate $X_{abl}$ [%] |                     |                                  |                                      |   |   |
|---------------------|---------------------------------------|---------------------|----------------------------------|--------------------------------------|---|---|
|                     | 0                                     | 20                  | 40                               | 60                                   | 80  | 100   |
| 300                 | $\tau_{CO_2,ion}$                     | $\tau_{CO_2,ion}$   | $\tau_{CO_2,ion}$                | $\tau_{CO_2,ion}$                    | $\tau_{CF_4,ion-2}, \tau_{CO_2,ion}$              | $\tau_{CF_4,ion-2}$                               |
| 400                 |                                       |                     |                                  |                                      |   |   |
| 500                 |                                       |                     |                                  | $\tau_{CO_2,ion}, \tau_{CF_4,ion-2}$ | $\tau_{CF_4,ion-2}$                               |   |
| 800                 |                                       |                     |                                  |                                      |   |   |
| 1000                |                                       |                     |                                  | $\tau_{CO_2,ion}, \tau_{CF_4,ion-2}$ | $\tau_{CF_4,ion-2}$                               |   |
| 1250                |                                       |                     |                                  |                                      |   |   |
| 1500                |                                       |                     |                                  | $\tau_{CO_2,ion}, \tau_{CF_4,ion-2}$ | $\tau_{CF_4,ion-2}$                               |   |
| 1750                |                                       |                     |                                  |                                      |   |   |
| 2000                |                                       |                     |                                  | $\tau_{CO_2,ion}, \tau_{CF_4,ion-2}$ | $\tau_{CF_4,ion-2}$                               |   |
| 2250                |                                       |                     |                                  |                                      |   |   |
| 2500                | $\tau_{CO_2,ion}, \tau_{CF_4,ion-2}$  | $\tau_{CF_4,ion-2}$ |                                  |                                      |   |   |
| 2750                |                                       |                     | $\tau_{CO_2,ion}, \tau_{CO,ion}$ | $\tau_{CO,ion}$                      | $\tau_{CF_2,ion}, \tau_{CO,ion}, \tau_{CF_4,ion}$ |   |
| 3000                | $\tau_{CO_2,ion}, \tau_{CO,ion}$      | $\tau_{CO,ion}$     |                                  |                                      |   | $\tau_{CF_2,ion}, \tau_{CO,ion}, \tau_{CF_4,ion}$ |
| 3250                |                                       |                     | $\tau_{CO_2,ion}, \tau_{CO,ion}$ | $\tau_{CO,ion}$                      | $\tau_{CF_2,ion}, \tau_{CO,ion}, \tau_{CF_4,ion}$ |   |
| 3500                | $\tau_{CO_2,ion}, \tau_{CO,ion}$      | $\tau_{CO,ion}$     |                                  |                                      |   | $\tau_{CF_2,ion}, \tau_{CO,ion}, \tau_{CF_4,ion}$ |
| 3750                |                                       |                     | $\tau_{CO_2,ion}, \tau_{CO,ion}$ | $\tau_{CO,ion}$                      | $\tau_{CF_2,ion}, \tau_{CO,ion}, \tau_{CF_4,ion}$ |   |
| 4000                | $\tau_{CO,ion}, \tau_{O,ion}$         | $\tau_{CO,ion}$     |                                  |                                      |   | $\tau_{CO,ion}, \tau_{CF_2,ion}, \tau_{CF_4,ion}$ |
|                     |                                       |                     | $\tau_{CO,ion}, \tau_{O,ion}$    | $\tau_{CO,ion}$                      | $\tau_{CO,ion}, \tau_{CF_2,ion}, \tau_{CF_4,ion}$ |   |

表 5-5 異なる温度および異なる PTFE 混入率における主要な付着反応

| Temperature $T$ [K] | PTFE concentration rate $X_{abl}$ [%] |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|---------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                     | 0                                     | 20                    | 40                    | 60                    | 80                    | 100                   |                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 300                 | $\tau_{CO_2,d-att}$                   | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ |                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 400                 |                                       |                       |                       |                       |                       |                       | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$                 |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 500                 |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                                       | $\tau_{CF_4,d-att-1}$                 | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$                 |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 800                 |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       | $\tau_{CF_4,d-att-1}$                 | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$                 |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 1000                |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       | $\tau_{CF_4,d-att-1}$                 | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$                 |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 1250                |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       | $\tau_{CF_4,d-att-1}$                 | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$                 |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 1500                |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       | $\tau_{CF_4,d-att-1}$                 | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 1750                |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ |                       |                       |                       |                       |                       |
| 2000                |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ |
| 2250                |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 2500                | $\tau_{CF_4,d-att-1}$                 | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ |                       |                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 2750                |                                       |                       |                       |                       |                       | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ | $\tau_{CF_4,d-att-1}$ |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 3000                |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       | $\tau_{O_2,d-att}, \tau_{CO_2,d-att}$ | $\tau_{CO_2,d-att}, \tau_{F_2,d-att}$ | $\tau_{CF,d-att}$     | $\tau_{CF,d-att}$     | $\tau_{CF,d-att}$     |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 3250                |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       | $\tau_{O_2,d-att}, \tau_{CO_2,d-att}$ | $\tau_{CO_2,d-att}, \tau_{F_2,d-att}$ | $\tau_{CF,d-att}$     | $\tau_{CF,d-att}$     | $\tau_{CF,d-att}$     |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 3500                |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       | $\tau_{O_2,d-att}, \tau_{CO_2,d-att}$ | $\tau_{CO_2,d-att}, \tau_{F_2,d-att}$ | $\tau_{CF,d-att}$     | $\tau_{CF,d-att}$     | $\tau_{CF,d-att}$     |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 3750                |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       | $\tau_{O_2,d-att}, \tau_{CO_2,d-att}$ | $\tau_{CO_2,d-att}, \tau_{F_2,d-att}$ | $\tau_{CF,d-att}$     | $\tau_{CF,d-att}$     | $\tau_{CF,d-att}$     |                                       |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 4000                |                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       |                                       |                                       |                       |                       |                       | $\tau_{O_2,d-att}, \tau_{CO_2,d-att}$ | $\tau_{CO_2,d-att}, \tau_{F_2,d-att}$ | $\tau_{CF,d-att}$     | $\tau_{CF,d-att}$     | $\tau_{CF,d-att}$     |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |

表 5-6 異なる温度および異なる PTFE 混入率における主要な粒子

|                     | PTFE concentration $X_{abl}$ [%] |                      |   |                     |                           |                     |
|---------------------|----------------------------------|----------------------|---|---------------------|---------------------------|---------------------|
|                     | 0                                | 20                   | 40  | 60                  | 80                        | 100                 |
| Temperature $T$ [K] | 300                              | CO <sub>2</sub>      | CO <sub>2</sub>                           | CO <sub>2</sub>     | CF <sub>4</sub>           | CF <sub>4</sub>     |
|                     | 400                              |                      |   |                     |                           |                     |
|                     | 500                              |                      |   |                     |                           |                     |
|                     | 800                              |                      |   |                     |                           |                     |
|                     | 1000                             |                      | CO <sub>2</sub> ,<br>CF <sub>4</sub> , CO | CO, CF <sub>4</sub> |                           |                     |
|                     | 1250                             |                      | CO <sub>2</sub> , CO                      |                     | CO                        |                     |
|                     | 1500                             |                      |   |                     |                           |                     |
|                     | 1750                             |                      | CO <sub>2</sub> , CO,<br>COF <sub>2</sub> |                     |                           |                     |
|                     | 2000                             |                      |   |                     |                           |                     |
|                     | 2250                             |                      | CO, CO <sub>2</sub> ,<br>COF <sub>2</sub> |                     |                           |                     |
|                     | 2500                             |                      |   |                     |                           |                     |
|                     | 2750                             | CO, CO <sub>2</sub>  | CO  |                     |                           |                     |
|                     | 3000                             | CO <sub>2</sub> , CO | CO, F                                     | CO, CF <sub>2</sub> | CF <sub>2</sub>           |                     |
|                     | 3250                             |                      |   | CO, F               | F, CO,<br>CF <sub>2</sub> | CF <sub>2</sub> , F |
|                     | 3500                             | CO, CO <sub>2</sub>  | F, CO                                     |                     |                           |                     |
|                     | 3750                             | CO                   |   | F, CO               | F                         |                     |
| 4000                |                                  |                      |   |                     |                           |                     |

## 5.8 おわりに

本章では、高温 CO<sub>2</sub> ガスに PTFE 溶発蒸気が混入した場合の換算臨界電界を推定するために、粒子組成、電離衝突頻度および付着衝突頻度などを用いて換算電離係数と換算電子付着係数を数値計算により求めた。結果として、2,000 K 以下の場合、PTFE 溶発蒸気が混入した CO<sub>2</sub> ガスの換算臨界電界は、PTFE 溶発蒸気の混入に伴って、主に CF<sub>4</sub> の数が増加するため、純粋 CO<sub>2</sub> ガスの換算臨界電界よりも大きくなる。一方で、2,000 K を超える高温領域において、PTFE 溶発蒸気が 20% もしくは 40% 混入した CO<sub>2</sub> ガスの換算臨界電界は、CO の付着効果が減少しており CF の付着効果が増加していないため、純粋 CO<sub>2</sub> ガスの換算臨界電界を下回る。しかしながら、PTFE 溶発蒸気混入率が 60% を超えると、CF<sub>4</sub> の付着効果が大きく影響して、常に純粋 CO<sub>2</sub> の換算臨界電界を上回ることが明らかとなった。

次に、換算臨界電界に影響を与える主要な反応およびガスを構成する支配的な粒子を一覧にして表にまとめた。その結果、ガスを構成する支配的な粒子もしくは大きな衝突断面積を持つ粒子

が主要な反応であることがわかった。

本研究により, PTFE 溶発蒸気が純粋 CO<sub>2</sub> ガスへ混入することにより換算臨界電界は上昇する場合のあることが明らかになった。すなわち, PTFE 溶発蒸気が CO<sub>2</sub> ガスへ混入することは, 誘電的破壊領域において, 絶縁能力が向上する可能性があることを示唆している。

## 第 5 章の参考文献

- [1] M. Rong, H. Sun, F. Yand, Y.Wu, Z. Chen, X.Wang, and M. Wu: “Influence of O<sub>2</sub> on the dielectric properties of CO<sub>2</sub> at the elevated temperatures”, *Phys. Plasmas*, Vol.12, 112117 (2014)
- [2] X. Xiaoling, J. Juntao, and X. Dengming: “Breakdown Electric Field of Hot 30% CF<sub>3</sub>I/CO<sub>2</sub> Mixtures at Temperature of 300–3500K During Arc Extinction Process”, *Plasma Sci. & Technol.*, Vol.18, No.11 (2016-11)
- [3] L. Zhong, A. Yang, X. Wang, D. Liu, Y.Wu, and M. Rong: “Dielectric breakdown properties of hot SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> mixtures at temperatures of 300–3500K and pressures of 0.01–1.0MPa”, *Phys. Plasmas*, Vol.21, 053506 (2014)
- [4] Z. Chen, C. Niu, H. Zhang, H. Sun, Y. Wu, F. Yangm, M. Rong, and Z. Xu: “Investigation on the reduced critical breakdown field of hot CO<sub>2</sub> gas and CO<sub>2</sub>-based mixtures”, 2015 3rd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST) Busan, Korea, (Oct. 25–28 2015)
- [5] T. Uchii, Y. Hoshina, H. Kawano, K. Suzuki, T. Nakamoto, and M. Toyoda: “Fundamental Research on SF<sub>6</sub>-free Gas Insulated Swithgear Adopting CO<sub>2</sub> Gas and Its Mixtures”, *Proc. of International Symposium on Eco Topia Science 2007, ISETS07* (2007)
- [6] Y. Yokomizu, Y. Hayashi, T. Matsumura, A. Majima, T. Uchii, and K. Suzuki: “High-Temperature Properties of CO<sub>2</sub> Mixed with N<sub>2</sub>”, *IEEEJ Trans. PE*, Vol.133, No.11, pp.867–874 (2013)
- [7] H. Sun, M. Rong, Y. Wu, Z. Chen, F. Yang, A.B. Murphy, and H. Zhang: “Investigation on critical breakdown electric field of hot carbon dioxide for gas circuit breaker applications”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.48, 055201, IOP Publishing (16pp) (2015)
- [8] Publication IHSM 9543 21-06en, High voltage CO<sub>2</sub> circuit breaker type LTA, Edition 1,

2014-02 (2014)

- [9] X. Li, X. Guo, H. Zhao, S. Jia, and A.B. Murphy: “Prediction of the critical reduced electric field strength for carbon dioxide and its mixtures with copper vapor from Boltzmann analysis for a gas temperature range of 300K to 4000K at 0.4MPa”, *J. Appl. Phys.*, Vol.117, 143302 (2015)
- [10] 大沢直樹, 吉岡芳夫, 「熱パuffァ式 GCB におけるガス吹付け特性とガス通路構造との関係」, 電気学会論文誌 B, Vol. 123, No.10, pp.1208-1214(2003)
- [11] 佐藤基宗, 横水康伸, 堀之内克彦, 中村泰規, 芳友雄治, 清水芳則, 「SF<sub>6</sub> ガス遮断器のアーキ遮断過程におけるパuffァ室ガス圧力上昇の計算手法——ノズルアブレーション蒸気による加圧効果——」, 電気学会論文誌 B, Vol.140, No.4, pp.331-342(2020)
- [12] 大沢直樹, 吉岡芳夫, 「ノズルアブレーションを考慮した単一分子モデルによるガス遮断器の吹付け圧力の解析」, 電気学会論文誌 B, Vol.121, No.1, pp.88-94(2001)
- [13] 石井達也, 横水康伸, 小島勇輝, 寺田将直, 浦井一, 黒田真未, 「PTFE/BN 溶発分解蒸気が混入した高温 SF<sub>6</sub> ガスの衝突電離および電子付着係数-混入率 50%-」, 放電・プラズマ・パルスパワー, 開閉保護, 高電圧合同研究会, EPP-19-134, SP-19-56, HV-19-119(2019)
- [14] Y. Yokomizu, K. Murakita, Y. Kojima, T. Matsumura, M. Sato, and K. Horinouchi: “Rate Coefficient and Collision Frequency for Electron Collision Process in Hot SF<sub>6</sub> Gas under Electric Field: Electrical Breakdown Property at 300–3000 K”, *IEEJ Trans.*, Vol.14, No.4, pp.506–519 (2019) <https://doi.org/10.1002/tee.22834>
- [15] G.J.M. Hagelaar and L.C. Pitchford: “Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models”, *Plasma Sources Sci. Technol.*, Vol.14, pp.722–733 (2005) Doi:10.1088/09630252/14/4/011
- [16] Y. Yokomizu, N. Kodama, and T. Matsumura: “Chemical Species Produced through Dissociation and Recombination Reactions in Arc Quenching Gas CO<sub>2</sub>–O<sub>2</sub> Mixture: Admixture of Vapor Ablated from PTFE”, *J. LAPS*, Vol.26, No.1 (2018-6)
- [17] Phelps database, [www.lxcat.net](http://www.lxcat.net), retrieved on April 15, 2013.
- [18] Phelps database, [www.lxcat.net](http://www.lxcat.net), retrieved on October 22, 2012.
- [19] Morgan database, [www.lxcat.net](http://www.lxcat.net), retrieved on October 22, 2012.

- [20] Morgan database, [www.lxcat.net](http://www.lxcat.net), retrieved on July 12, 2018.
- [21] Quantemol database, [www.lxcat.net](http://www.lxcat.net)
- [22] I. Ruzum, P. Limao-Vieira, S. Eden, J. Tennyson, and N.J. Mason: “Electron interaction cross sections for CF<sub>3</sub>I, C<sub>2</sub>F<sub>4</sub> and CF<sub>x</sub> (x = 1-3) radicals”, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol.35, No.1, pp.267–284 (2006)
- [23] W.M. Huo, V. Tomovsky, and K.H. Becker: “Total electron-impact ionization cross-section of CF<sub>x</sub> and NF<sub>x</sub> (x = 1-3)”, *Chem. Phys. Lett.*, Vol.358, No.3-4, pp.328–336 (2002)
- [24] Z.D. Nikitovic, V.D. Tojanovic, J.P. Booth, and Z.L. Petrovic: “Electron transport coefficients in mixtures of CF<sub>4</sub> and CF<sub>2</sub> radicals”, *Plasma Sources Sci. Technol.*, Vol.18, 035008 (6pp) (2009)
- [25] K. Yoshida, S. Goto, H. Tagashira, C. Winstead, B.V. Mckoy, and W.L. Morgan: “Electron transport properties and collision cross sections in C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>”, *J. Appl. Phys.*, Vol.91, No.5, pp.2637–2647 (2002)
- [26] L.G. Christophorou and J.K. Olthoff: “Electron Interaction with C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>”, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol.27, No.1, pp.1–27 (1998)
- [27] W.L. Morgan: “A Critical Evaluation of Low-energy Electron Impact Cross Section for Plasma Processing Modeling. Cl<sub>2</sub>, F<sub>2</sub> and HCl”, *Plas. Chem. Plas. Chem. Plas. Proc.*, Vol.12, No.4, pp.449–476 (1992)
- [28] G.J. Cliteur, Y. Hayashi, E. Haginomori, and K. Suzuki: “Calculation of the Uniform Breakdown Field Strength of SF<sub>6</sub> Gas”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol.5, pp.843–849 (1998)
- [29] M. Yousfi, Ph. Rnbin-Jouan, and Z. Kanzari: “Electron-Molecule Collision Cross Sections Needed for Breakdown Electric Field Calculations of Hot Dissociated SF<sub>6</sub>”, *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol.115, 012012 (2008)
- [30] J. Kaur, N. Mason, and B. Antony: “Electron-scattering studies of carbonyl fluoride”, *Phys. Rev. A*, Vol.92, 052702 (2015)
- [31] T. Ishii, M. Terada, Y. Yokomizu, Y. Kojima, M. Kuroda, and H. Urai: “Critical Electric-Field Strength of High-Temperature SF<sub>6</sub> Mixture Gas with Ablated PTFE/BN Vapor at Temperatures of 300–4000K”, 2019 5th International Conference on Electric Power

Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), DOI: 10.1109/ICEPE-ST.2019.8928790





## 第6章 高温 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合ガスの粒子組成・臨界電界における C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 添加と PTFE 蒸気混入との等価性

### 6.1 はじめに

第 1 章で述べたように、ガス遮断器における代替消弧ガスの候補としては、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> や O<sub>2</sub> などの自然系ガスと、C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O、CF<sub>3</sub>I や C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N など人工系ガスに大別される。具体的には、CO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O、CO<sub>2</sub>/CF<sub>3</sub>I、CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N、CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 等の組み合わせが提案され、検討が進められている<sup>[1][11]</sup>。このとき、人工系ガスは、単体で用いられるのではなく、自然系ガスに混合することによって SF<sub>6</sub> と同等レベルの高い電気的性能を有することが期待されている。しかしながら、人工系ガスは液化温度が高いことから、特に寒冷地においては、混合率や封入圧の制限が危惧されており、例えば、C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O を例に挙げると、封入圧 0.8 MPa で約 8 °C の場合において 6 mol% が混合率の限界であることが報告されている<sup>[12]</sup>。

ここで、高温ガス冷却過程において再結合により生成される粒子種は、原子の供給元に依存せず、高温ガス中の原子の種類とその数により一意に定まると考えた。前章において取り上げた CO<sub>2</sub> ガスに PTFE(-C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>-) 溶発蒸気が混入したガス(以下、CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/PTFE ガスと記述する)と CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスは同原子種から構成されているため、これらの原子の数が等価になる条件が存在するならば、PTFE 溶発蒸気の混入を前提とすれば、液化リスクの問題から使用が制限されている C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O の混入率を減少もしくはゼロでも、同様の遮断性能が得られると考えた。

そこで、本章では、CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスと PTFE 溶発蒸気(-C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>-)が混入した CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/PTFE ガスにおいて、どちらも同種の原子から構成されていることに着目し、アーク放電に伴う熱解離後の原子のモル分率が等価になる条件を求め、高温状態における粒子組成ひいては臨界電界が二つの混合ガスで等価になるかを調査した。なお、ここでは、各分子ガスの混合割合を室温で混合した場合の値で示し(PTFE 溶発蒸気に関しては、室温において、単体の C<sub>2</sub>F<sub>4</sub> 分子が対象空間に分散して存在していると想定)、その混合ガスがいったん熱解離した後の冷却過程で生成される粒子組成を取り扱っている。

### 6.2 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスと PTFE 溶発蒸気が混入した CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合ガスとの等価性

ガス遮断器内部のような高圧ガス中において発生するアーク放電は、粒子密度が高いため、構成粒子間の衝突が頻繁に起こり、アーク陽光柱内部の温度は数万 K に達する。このような場合に

において、ガスの構成粒子は熱解離して原子状態に、さらにそれらが電離イオン状態になる。ここで、常温においてガスの分子種が異なる二つの混合ガスを取り上げる。両者が熱解離によって全てバラバラの原子になった状態を考えると、各種原子のモル分率が両者においてそれぞれ同じであれば、元の混合ガスの分子種に関係なく、その冷却過程で再結合により生成される粒子は同じになると考えられる。

### 6.2.1 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスの各原子のモル分率

常温 300 K において、O<sub>2</sub> ガスのモル分率が  $x$ 、C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O ガスのモル分率が  $y$  で、全体で 1 mol の CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスを取り上げ、この混合ガスが熱解離してすべて原子になった場合を考える。この場合、常温での CO<sub>2</sub> のモル分率は  $1-x-y$  であるので、ガスの構成原子である C と O と F の原子の数は、

$$\text{C: } (1-x-y) + 5y = 1-x+4y \quad (6-1)$$

$$\text{O: } 2(1-x-y) + 2x + y = 2-y \quad (6-2)$$

$$\text{F: } 10y \quad (6-3)$$

と表される。対象空間における全原子数は、これらの総和であり、 $3-x+13y$  [mol] である。したがって、それぞれの原子のモル分率は、

$$\text{C: } \frac{1-x+4y}{3-x+13y} \quad (6-4)$$

$$\text{O: } \frac{2-y}{3-x+13y} \quad (6-5)$$

$$\text{F: } \frac{10y}{3-x+13y} \quad (6-6)$$

と表すことができる。

### 6.2.2 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/PTFE ガスの各原子のモル分率

ここでは、CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/PTFE ガス(全体で 1 mol)の場合について考える。O<sub>2</sub> のモル分率が  $a$  の CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合ガス (CO<sub>2</sub> のモル分率は  $1-a$ ) に PTFE 蒸気が  $b$  だけ混入したとき、CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/PTFE ガスのモル分率比は、CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/PTFE(-C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>)= $(1-a)(1-b)/a(1-b)/b$  と表される。このガスが熱解離して全て原子になったとすると、ガスの構成原子である C と O と F の粒子の数は、

$$\text{C: } (1-a)(1-b) + 2b = 1-a + (1+a)b \quad (6-7)$$

$$\text{O: } 2(1-a)(1-b) + 2a(1-b) = 2 - 2b \quad (6-8)$$

$$\text{F: } 4b \quad (6-9)$$

であり、全体の総量は、 $3-a+(3+a)b$  [mol]となる。したがって、それぞれの原子のモル分率は、

$$\text{C: } \frac{1-a+(1+a)b}{3-a+(3+a)b} \quad (6-10)$$

$$\text{O: } \frac{2-2b}{3-a+(3+a)b} \quad (6-11)$$

$$\text{F: } \frac{4b}{3-a+(3+a)b} \quad (6-12)$$

と表される。

### 6.2.3 等価条件式の導出

式(6-4)と式(6-10)、式(6-5)と式(6-11)、式(6-6)と式(6-12)とがそれぞれ等しければ、二つの混合ガスにおいて、冷却過程で生成される粒子の組成もまた同じになると考えられる。すなわち、

$$\text{C: } \frac{1-x+4y}{3-x+13y} = \frac{1-a+(1+a)b}{3-a+(3+a)b} \quad (6-13)$$

$$\text{O: } \frac{2-y}{3-x+13y} = \frac{2-2b}{3-a+(3+a)b} \quad (6-14)$$

$$\text{F: } \frac{10y}{3-x+13y} = \frac{4b}{3-a+(3+a)b} \quad (6-15)$$

まず、式(6-14)および式(6-15)から、 $a$  および  $b$  を求めると、

$$a = \frac{2x+y}{2-y} \quad (6-16)$$

$$b = \frac{5y}{2+4y} \quad (6-17)$$

が得られる。得られた式(6-16)および式(6-17)は式(6-13)を満たしていることが確認できる。

このことは、ここで取り上げた二つの混合ガスの高温状態において、両者の粒子組成が同じになる条件が存在していることを示している。

### 6.2.4 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスと等価な CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/PTFE ガスに関する検討

以上の様に、O<sub>2</sub> が  $x$ 、C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O が  $y$  だけ混合した CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスと等価な

CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/PTFE ガスの PTFE 蒸気の混合率  $b$  は、 $y$  だけに依存し、 $x$  には依存しないことが分かる。また、O<sub>2</sub> の混合率  $a$  は、当然のことながら、 $x$  と  $y$  で決まる。

これらの関係を図 6-1 に示す。同図(i)に  $a$  および  $b$  の  $x$  依存性を、 $y$  をパラメータにとって、示している。また、 $y$  依存性を、 $x$  をパラメータにとって示したのが同図(ii)である。なお、両図において、 $a$  を実線、 $b$  を破線で描いており、混合率  $x+y$  は 1 よりも大きくなならないので、1 以下となる範囲のみ描いている。

図 6-1(i)から、 $a$  は常に  $x$  よりも大きい必要があることがわかる。一方で、前述のように、 $b$  は  $x$  に関わらず一定であることが分かる。

図 6-1(ii)から、 $a$  は  $x$  が大きくなるほど、上にシフトしている。 $b$  は  $x$  に関わらず同じ曲線を描いている。ただし、 $x+y \leq 1$  でなければならないので、 $x=0, 0.1, 0.2$  および  $0.4$  のとき、 $y$  はそれぞれ  $1, 0.9, 0.8$  および  $0.6$  以下の範囲しか取り得ない。また、 $y$  は 1 よりも大きな値を取らないことから、 $b$  の最大値は  $5/6=0.833$  である。これは、 $b$  が 83.3 mol% よりも大きい場合、等価な CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスは存在しないことを示している。

表 6-1 に、 $y$  が 10 mol%、20 mol% の場合に対して、CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスと CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/PTFE ガスとが等価になる条件を示している。たとえば、 $x=20$  mol%、 $y=10$  mol% の CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスの場合、CO<sub>2</sub> の混合率  $(1-x-y)$  は 70 mol% であり、その場合と等価になる CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> に混入すべき PTFE の混入比  $b$  は 20.8 mol% である。また、その時の CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> の混合比は 0.737 / 0.263 である。さらに、先述のように、PTFE の混入率  $b$  は  $x$  に依存していないことが確認できる。

### 6.2.5 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/PTFE ガスと等価な CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスに関する検討

ここで、CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/PTFE ガスと等価な CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスに関して、 $x$  および  $y$  の  $a$  および  $b$  依存性を考えると、式(6-16)と式(6-17)より、

$$x = \frac{5a(1-b)-b}{5-4b} \quad (6-18)$$

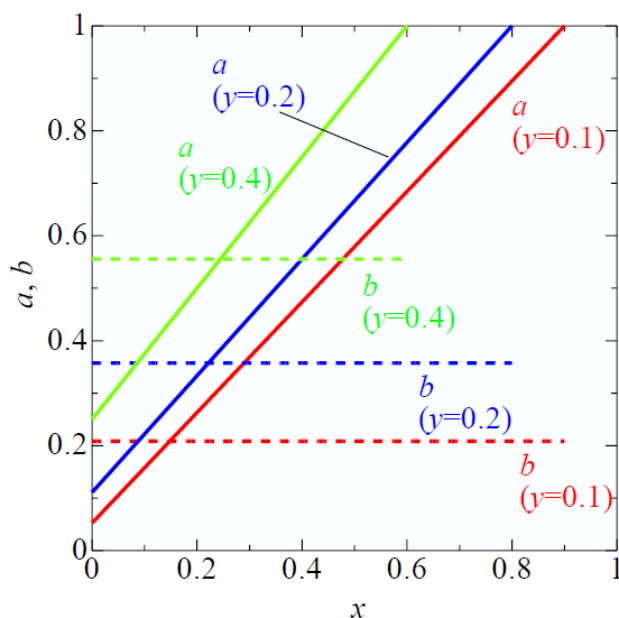
$$y = \frac{2b}{5-4b} \quad (6-19)$$

と表される。

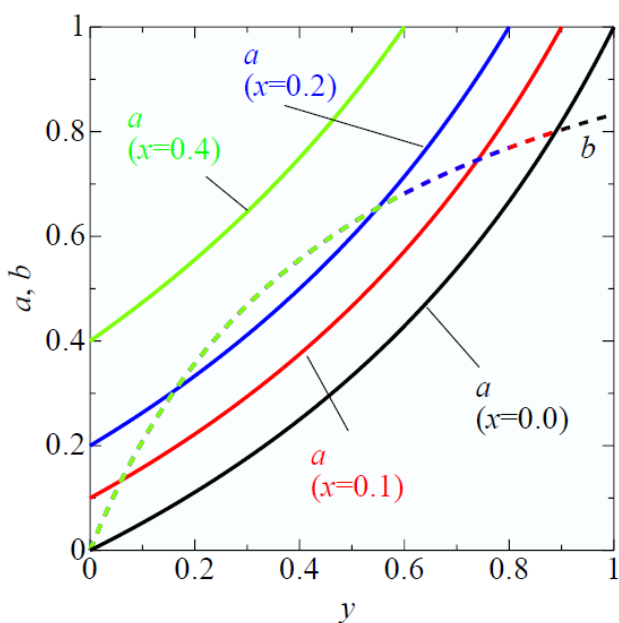
以上の様に、 $x$  は  $a$  と  $b$  から決まり、 $y$  は  $a$  には依存しない。これらの関係を図 6-2 に示す。同図(i)に  $x$  および  $y$  の  $a$  依存性を、 $b$  をパラメータにとって、示している。また、 $b$  依存性を、 $a$  をパラメータにとって示したのが同図(ii)である。なお、両図において、 $x$  を実線、

$y$  を破線で示している。

図 6-2(i)から、 $a$  の増加にしたがって、 $x$  は直線的に増加しており、 $y$  は一定の値となっていることが分かる。図 6-2(ii)から、 $b$  の増加に従って、 $x$  は減少していき、やがて 0 になる。



(i) Dependence on  $O_2(x)$



(ii) Dependence on  $C_5F_{10}O(y)$

図 6-1  $CO_2(1-x-y)/O_2(x)/C_5F_{10}O(y)$ ガスと等価になる PTFE 溶発蒸気( $b$ )が混入した  $CO_2(1-a)/O_2(a)$ ガスの条件

例えば、 $a=0.1$  の場合では、 $b$  が  $1/3$  のとき、 $x$  は  $0$  になる。

### 6.3 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスと PTFE 溶発蒸気が混入した純粋 CO<sub>2</sub> ガスとの等価性

CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスと PTFE 蒸気が混入した純粋 CO<sub>2</sub> ガスとの等価性について述べる。この条件は、6.2 節で述べた条件における  $a=0$  の場合である。したがって、式(6-18)および(6-19)から、

$$x = \frac{-b}{5-4b} \quad (6-20)$$

$$y = \frac{2b}{5-4b} \quad (6-21)$$

よって、

$$y = -2x \quad (6-22)$$

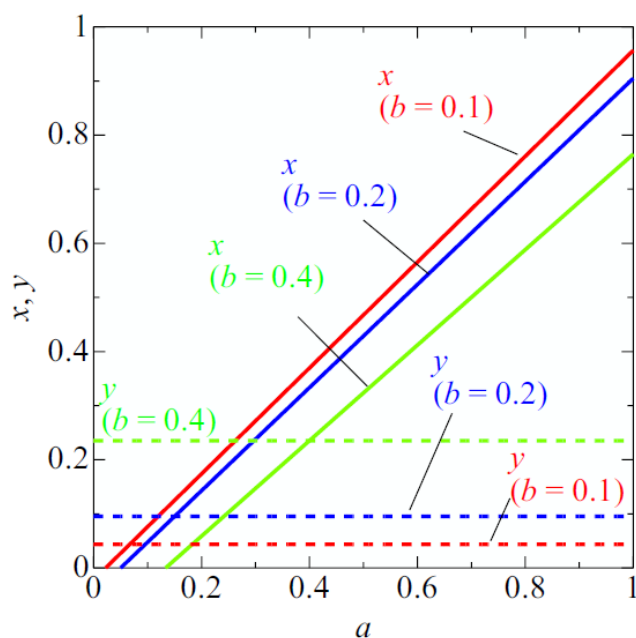
である。 $x$  と  $y$  は両方とも  $0$  以上である必要があるので、この場合における適切な解は存在せず、等価となる組み合わせは存在しないことを表している。

表 6-1 CO<sub>2</sub>(1-x-y)/O<sub>2</sub>(x)/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O(y)ガスと PTFE 溶発蒸気(b)が混入した CO<sub>2</sub>(1-a)/O<sub>2</sub>(a)ガスとの等価性

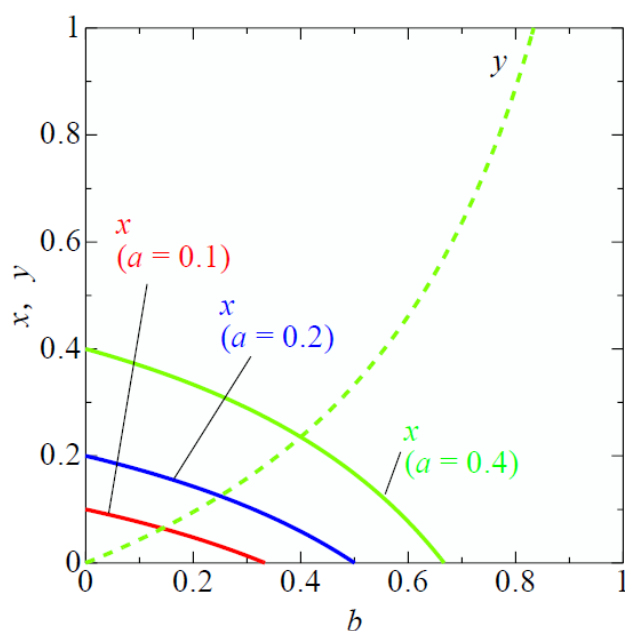
| CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O |                |                                  | (CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> )/PTFE(-C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> -) |                |       |
|---|----------------|----------------------------------|---|----------------|-------|
| CO <sub>2</sub>   | O <sub>2</sub> | C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O | CO <sub>2</sub>   | O <sub>2</sub> | PTFE  |
| 1-x-y   | x              | y                                | 1-a   | a              | b     |
| 0.9   | 0              | 0.1                              | 0.947   | 0.053          | 0.208 |
| 0.7   | 0.2            | 0.1                              | 0.737   | 0.263          | 0.208 |
| 0.5   | 0.4            | 0.1                              | 0.526   | 0.474          | 0.208 |
| 0.3   | 0.6            | 0.1                              | 0.316   | 0.684          | 0.208 |
| 0.1   | 0.8            | 0.1                              | 0.105   | 0.895          | 0.208 |
| 0.8   | 0              | 0.2                              | 0.889   | 0.111          | 0.357 |
| 0.6   | 0.2            | 0.2                              | 0.667   | 0.333          | 0.357 |
| 0.4   | 0.4            | 0.2                              | 0.444   | 0.556          | 0.357 |
| 0.2   | 0.6            | 0.2                              | 0.222   | 0.778          | 0.357 |
| 0   | 0.8            | 0.2                              | 0.000   | 1.000          | 0.357 |

## 6.4 CO<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスと PTFE 溶発蒸気が混入した CO<sub>2</sub> ガスとの等価性

CO<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスと PTFE 蒸気が混入した CO<sub>2</sub> ガスとの等価性については、6-2 章で述



(i) Dependence on O<sub>2</sub>( $a$ )



(ii) Dependence on PTFE( $b$ )

図 6-2 PTFE 溶発蒸気( $b$ )が混入した CO<sub>2</sub>( $1-a$ )/O<sub>2</sub>( $a$ )ガスと等価になる  
CO<sub>2</sub>( $1-x-y$ )/O<sub>2</sub>( $x$ )/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O( $y$ )ガスの条件

べた条件における  $a = x = 0$  の場合に等しいため、式(6-16)は、

$$0 = \frac{y}{2-y} \quad (6-23)$$

したがって、 $y = 0$  となり、等価となる組み合わせは存在しない。

## 6.5 等価な条件における高温ガスの粒子組成および換算臨界電界

例として、表 6-1 における条件のうち、 $\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$  混合ガスのモル分率比が 0.7/0.2/0.1 の場合における粒子組成を図 6-3 に示している。また、それと等価と推定された、 $\text{O}_2$  を 26.3 mol% 混合した  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  混合ガスに PTFE が 20.8 mol% だけ混入した高温ガスの粒子組成を図 6-4 に示す。両図は、一度、温度が 30,000 K まで増加したガスの温度が低下していく過程において再結合により生成される粒子を 300 K から 4,000 K の範囲で示している。粒子組成は、前章で説明したように横水氏らの計算データを利用した。両図を比較すると、まったく同じ粒子組成となっていることが確認できる。

また、図 6-5 には、両混合ガスの粒子組成から求めた換算臨界電界を同時に描いている。算出は前章で示した方法で実施した。同図において、プロットが重なっていることから、計算結果が全く同じであることが確認できる。

## 6.6 $\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合ガスと PTFE 溶発蒸気が混入した $\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合ガスとの等価性

前節までは、 $\text{CO}_2/\text{O}_2$  混合ガスに、 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$  の代わりに PTFE 溶発蒸気が混入することを想定していたが、実際には、 $\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$  混合ガスにも PTFE 溶発蒸気が混入することと考えられる。そのため、 $\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$  混合ガスと  $\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$  に PTFE 溶発蒸気が混入したガスとが等価になる条件に関して検討する。6-2 節で示したのと同様の手順で、 $\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$  混合ガスのモル分率比が  $(1-c-d)/c/d$  の場合と  $\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$  のモル分率比が  $(1-x-y)/x/y$  である混合ガスに PTFE 溶発蒸気が  $z$  混入した場合について考えると、両ガスの等価な条件は、下記の等式で表される。

$$\text{C: } \frac{1-c+4d}{3-c+13d} = \frac{1-x+4y-(-1-x-4y)z}{3-x+13y+(3+x-13y)z} \quad (6-24)$$

$$\text{O: } \frac{2-d}{3-c+13d} = \frac{2-y-(2-y)z}{3-x+13y+(3+x-13y)z} \quad (6-25)$$



$$F: \frac{10d}{3-c+13d} = \frac{10y-(10y-4)z}{3-x+13y+(3+x-13y)z} \quad (6-26)$$

これらの関係式から、 $c$  および  $d$  を求めると、

$$c = \frac{5x-(1+5x)z}{5-4z} \quad (6-27)$$

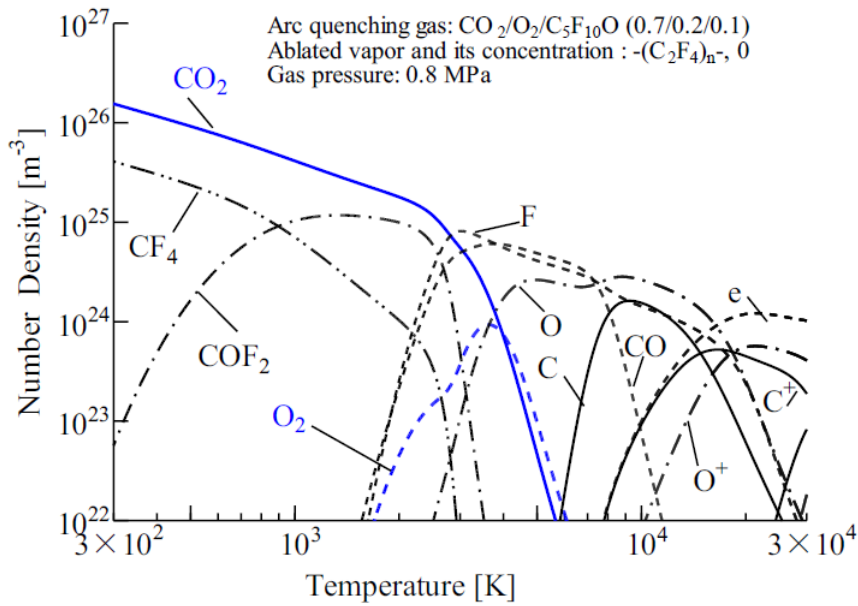


図 6-3 CO<sub>2</sub>0.7/O<sub>2</sub>0.2/C<sub>3</sub>F<sub>10</sub>O 0.1 混合ガスの粒子組成

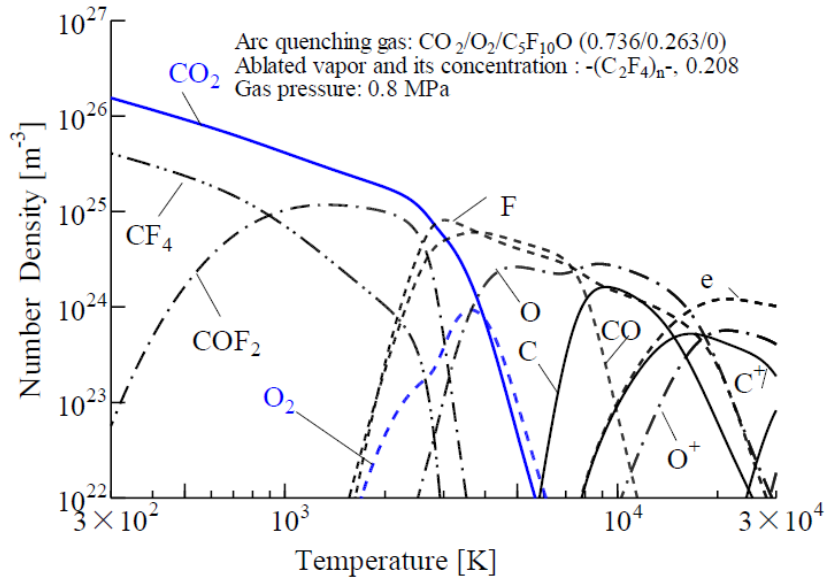


図 6-4 PTFE 溶発溶発蒸気が 0.208 混入した CO<sub>2</sub>0.736/O<sub>2</sub>0.263 混合ガスの粒子組成

$$d = \frac{5y - (5y - 2)z}{5 - 4z} \quad (6-28)$$

以上の様に、 $c$ は $x$ と $z$ で決まり、 $y$ には依存しない。また、 $d$ は $y$ と $z$ で決まり、 $x$ には依

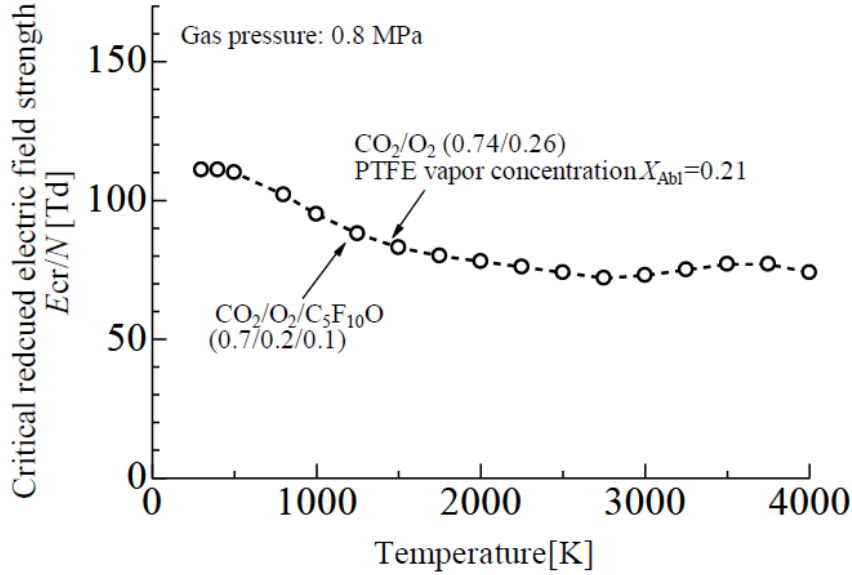


図 6-5 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O ガスと CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> に PTFE 溶発蒸気が混入したガスとの等価な条件における換算臨界電界  
( $x = 0.2, y = 0.1, a = 0.263, b = 0.208$ )

表 6-2 CO<sub>2</sub>(1-c-d)/O<sub>2</sub>(c)/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O(d)ガスと PTFE(z)が混入した CO<sub>2</sub>(1-x-y)/O<sub>2</sub>(x)/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O(y)ガスとの等価性

| CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O |                |                                  | (CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O)/PTFE(-C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> -) |                |                                  |      |
|---|----------------|----------------------------------|--|----------------|----------------------------------|------|
| CO <sub>2</sub>   | O <sub>2</sub> | C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O | CO <sub>2</sub>  | O <sub>2</sub> | C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O | PTFE |
| 1-c-d   | c              | d                                | 1-x-y  | x              | y                                | z    |
| 1.000   | 0.000          | 0.000                            | 1  | 0              | 0                                | 0    |
| 0.714   | 0.143          | 0.143                            | 0.75   | 0.2            | 0.05                             | 0.2  |
| 0.524   | 0.333          | 0.143                            | 0.55   | 0.4            | 0.05                             | 0.2  |
| 0.143   | 0.714          | 0.143                            | 0.15   | 0.8            | 0.05                             | 0.2  |
| 0.667   | 0.143          | 0.190                            | 0.7  | 0.2            | 0.1                              | 0.2  |
| 0.476   | 0.333          | 0.190                            | 0.5  | 0.4            | 0.1                              | 0.2  |
| 0.095   | 0.714          | 0.190                            | 0.1  | 0.8            | 0.1                              | 0.2  |
| 0.662   | 0.059          | 0.279                            | 0.75   | 0.2            | 0.05                             | 0.4  |
| 0.485   | 0.235          | 0.279                            | 0.55   | 0.4            | 0.05                             | 0.4  |
| 0.132   | 0.588          | 0.279                            | 0.15   | 0.8            | 0.05                             | 0.4  |
| 0.618   | 0.059          | 0.324                            | 0.7  | 0.2            | 0.1                              | 0.4  |
| 0.441   | 0.235          | 0.324                            | 0.5  | 0.4            | 0.1                              | 0.4  |
| 0.088   | 0.588          | 0.324                            | 0.1  | 0.8            | 0.1                              | 0.4  |

存しない。

両ガスの等価な条件を表 6-2 に示している。同表より、CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスに PTFE 溶発蒸気が混入することで、C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O の混合率を少なくしても同等の特性となることが確認できる。例えば、C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O の混合率  $d$  が 14.3 mol% の CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O の混合ガスと PTFE 蒸気が 20 mol%、C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O が 5 mol% の CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O/PTFE ガスとが等価である。すなわち、PTFE が 20 mol% 混入することを前提とすれば、C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O の混合量を 65% 少なくしても、PTFE が混入しないと想定した時と同等の性能が得られることが期待できる。

## 6.7 CO<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスと PTFE 溶発蒸気が混入した CO<sub>2</sub> ガスとの類似性

6-4 節において述べたように、CO<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスと PTFE 溶発蒸気が混入した CO<sub>2</sub> ガスにおいて、等価になる条件は存在しない。そこでここでは、類似した特性となる条件を検討する。

### 6.7.1 一種類の原子のモル分率が等価になる条件

CO<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスと PTFE 蒸気が混入した CO<sub>2</sub> ガスとの等価性に関しては、2 章で述べた条件における  $a = x = 0$  の場合に等しいため、式(6-13)、式(6-14)、および式(6-15)は、

$$\text{C: } \frac{1+4y}{3+13y} = \frac{1}{3} \quad (6-29)$$

$$\text{O: } \frac{2-y}{3+13y} = \frac{2-2b}{3+3b} \quad (6-30)$$

$$\text{F: } \frac{10y}{3+13y} = \frac{4b}{3+3b} \quad (6-31)$$

前述の通り、式(6-29)から式(6-31)を同時に満たす解は、 $y=0$ 、 $b=0$  のみである。そこで、類似した特性となる条件として、今回取り上げたガスを構成している三種類の原子(C, O, F)のうち一種類の原子のモル分率が等しくなる条件を検討する。

はじめに、C 原子のモル分率が等しくなる条件は、式(6-29)より  $b$  に無関係で、

$$y=0 \quad (6-32)$$

である。

次に、O 原子のモル分率が等しくなる条件は、式(6-30)より、

$$y = \frac{12b}{29 - 23b} \quad (6-33)$$

である。

F原子のモル分子が等しくなる条件は、式(6-31)より、

$$y = \frac{12b}{30 - 22b} \quad (6-34)$$

となる。

以上三つの  $y$  の  $b$  依存性を図 6-6 に図示する。同図より、C が等しくなる条件は純粋  $\text{CO}_2$  ( $y = 0$ ) の時のみであり、混合ガスとしては C のモル分率が等しくなることはないことがわかる。

また、O が等しくなる  $y$  と F が等しくなる  $y$  とを比較すると、 $b$  が小さい場合には、ほぼ同じであるが、 $b$  が大きい場合には両者に差があることが確認できる。

さらに、 $y$  は 1 以上の値とならないので、式(6-33)より、 $b$  が 0.829 より大きい場合には、O が等しくなる組み合わせは存在しない。同様に、式(6-34)より、 $b$  が 0.882 より大きい場合には、F が等しくなる組み合わせは存在しない。

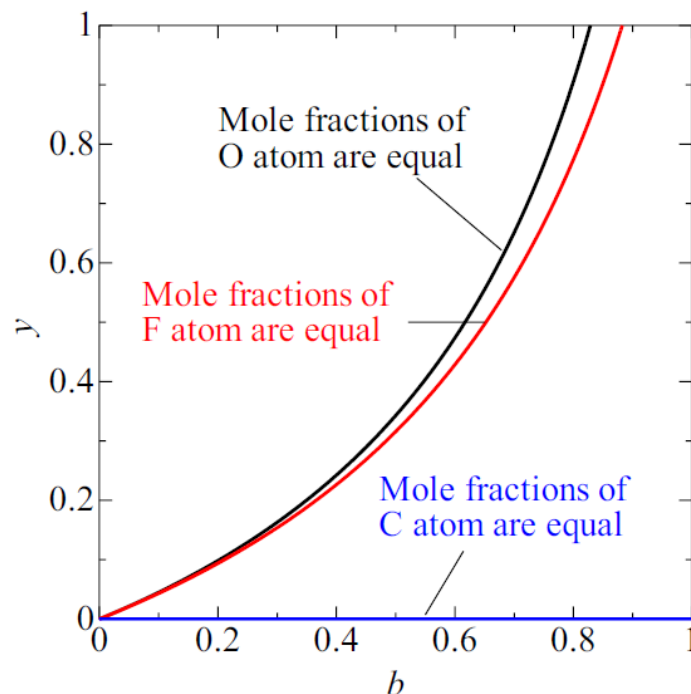


図 6-6 三種類の原子のモル分率のうち一種類のモル分率が等しくなるように混合した場合における  $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}(y)$  の PTFE( $b$ )依存性

表 6-3 には、PTFE 溶発蒸気が混入した CO<sub>2</sub> ガスに対して、一種類の原子のモル分率を等しくするための CO<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスの混合条件を示しており、同表(i)は O が等しくなるように混合する場合、同表(ii)は F が等しくなるように混合する場合の条件である。例えば、PTFE 蒸気が 80 mol%混入した CO<sub>2</sub> ガスに対して、O のモル分率が等しくなるのは、CO<sub>2</sub> および C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O をそれぞれ 9.4 mol%および 90.6 mol%で混合させた場合であることがわかる。一方で、F のモル分率が等しくなるのは、CO<sub>2</sub> および C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O をそれぞれ 22.6 mol%および 77.4 mol%で混合させた場合である。

表 6-3 三種類の原子のうち一種類の原子のモル分率を等しくするための混合条件

(i) Mixed to equal O atoms

| CO <sub>2</sub> | PTFE     | CO <sub>2</sub> | C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O |
|-----------------|----------|-----------------|----------------------------------|
| 1- <i>b</i>     | <i>b</i> | 1- <i>y</i>     | <i>y</i>                         |
| 1.000           | 0.000    | 1.000           | 0.000                            |
| 0.900           | 0.100    | 0.955           | 0.045                            |
| 0.800           | 0.200    | 0.902           | 0.098                            |
| 0.700           | 0.300    | 0.837           | 0.163                            |
| 0.600           | 0.400    | 0.758           | 0.242                            |
| 0.500           | 0.500    | 0.657           | 0.343                            |
| 0.400           | 0.600    | 0.526           | 0.474                            |
| 0.300           | 0.700    | 0.349           | 0.651                            |
| 0.200           | 0.800    | 0.094           | 0.906                            |
| 0.171           | 0.829    | 0.000           | 1.000                            |

(ii) Mixed to equal F atoms

| CO <sub>2</sub> | PTFE     | CO <sub>2</sub> | C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O |
|-----------------|----------|-----------------|----------------------------------|
| 1- <i>b</i>     | <i>b</i> | 1- <i>y</i>     | <i>y</i>                         |
| 1.000           | 0.000    | 1.000           | 0.000                            |
| 0.900           | 0.100    | 0.957           | 0.043                            |
| 0.800           | 0.200    | 0.906           | 0.094                            |
| 0.700           | 0.300    | 0.846           | 0.154                            |
| 0.600           | 0.400    | 0.774           | 0.226                            |
| 0.500           | 0.500    | 0.684           | 0.316                            |
| 0.400           | 0.600    | 0.571           | 0.429                            |
| 0.300           | 0.700    | 0.425           | 0.575                            |
| 0.200           | 0.800    | 0.226           | 0.774                            |
| 0.118           | 0.882    | 0.000           | 1.000                            |

## 6.7.2 一種類の原子のモル分率が同じになるように混合した場合のそれ以外の原子の過不足割合

ここでは、一種類の原子のモル分率が同じになる場合について、PTFE が混入した場合の  $\text{CO}_2$  ガスに対する  $\text{CO}_2/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$  混合ガスの各原子の過不足割合に関して検討する。前節で述べたように、C のモル分率が等しくなる場合は混合ガスとしては存在しないので、O が等しくなるように混合した場合と F が等しくなるように混合した場合を考える。

まず、O が等しくなるように混合した場合の C の過不足割合を求める。ここで、式(6-29)の左辺は  $\text{CO}_2/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$  混合ガスの C のモル分率を表しており、同式の右辺は PTFE が混入した場合の  $\text{CO}_2$  ガスの C のモル分率を表している。そして、式(6-33)は O が等しくなるように混合するための  $y$  を示している。したがって、O が等しくなるように混合した場合における  $\text{CO}_2/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$  混合ガスの C のモル分率  $f_{\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}_-\text{O}-\text{C}}$  は、式(6-33)を式(6-29)の左辺に代入することで、 $b$  の関数として、下記のように表すことができる。

$$f_{\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}_-\text{O}-\text{C}} = \frac{1 + 4\left(\frac{12b}{29 - 23b}\right)}{3 + 13\left(\frac{12b}{29 - 23b}\right)} = \frac{1 + \frac{25}{29}b}{3(1+b)} \quad (6-35)$$

この  $f_{\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}_-\text{O}-\text{C}}$  は式(6-29)の右辺とは  $b = 0$  以外では等しくならない。すなわち、O が等しくなるように混合した場合、両ガスにおける C のモル分率は互いに等しくならない。そこで、O が等しくなるように混合した場合、 $\text{CO}_2/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$  混合ガスの C が、PTFE が混入した場合の  $\text{CO}_2$  ガスの C よりどれだけ多いかを、次式の過不足割合  $\epsilon_{\text{O}-\text{C}}$  で表すこととした。

$$\epsilon_{\text{O}-\text{C}} = \frac{f_{\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}_-\text{O}-\text{C}} - \text{式(6-29)右辺}}{\text{式(6-29)右辺}}$$

すなわち、

$$\epsilon_{\text{O}-\text{C}} = \frac{\frac{1 + \frac{25}{29}b}{3(1+b)} - \frac{1}{3}}{\frac{1}{3}} = \frac{-4b}{29(1+b)} \quad (6-36)$$

同様に、O が等しくなるように混合した場合の F の過不足割合は、次のように求められる。

式(6-33)を式(6-31)の左辺に代入すると、

$$f_{\text{CSF}_{10}\text{O}_F} = \frac{10\left(\frac{12b}{29-23b}\right)}{3+13\left(\frac{12b}{29-23b}\right)} = \frac{40b}{29(1+b)} \quad (6-37)$$

だから,

$$\varepsilon_{\text{O}_F} = \frac{\frac{40b}{29(1+b)} - \frac{4b}{3+3b}}{\frac{4b}{3+3b}} = \frac{1}{29} \quad (6-38)$$

と求められる。

また、F が等しくなるように混合した場合に関して考えると、C の過不足割合  $\varepsilon_{\text{F}_C}$  は、式(6-29)と式(6-34)より、

$$\varepsilon_{\text{F}_C} = \frac{-2b}{15(1+b)} \quad (6-39)$$

O の過不足割合  $\varepsilon_{\text{F}_O}$  は、式(6-30)および式(6-24)より、

$$\varepsilon_{\text{F}_O} = \frac{b}{15(1-b)} \quad (6-40)$$

となる。

これらの関係を図 6-7 に示す。同図において、正の値は  $\text{CO}_2/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$  混合ガスの原子が過剰であることを表し、負の値は原子が不足していることを表している。同図より、 $\varepsilon_{\text{O}_C}$  および  $\varepsilon_{\text{F}_C}$  の  $b$  依存性はほぼ同じ特性となっている。また、 $\varepsilon_{\text{O}_F}$  は  $b$  に依存せず一定( $1/29=0.034$ )となり、 $\varepsilon_{\text{F}_O}$  は  $b$  の増加に対して指数関数的に増加していることが確認できる。

### 6.7.3 一種類の原子のモル分率をほぼ同じにした場合の換算臨界電界

ここで、 $b=0.8$  の場合( $\text{CO}_2 20\text{mol}\%/\text{PTFE} 80\text{mol}\%$ )を取り上げ、その換算臨界電界を計算し、温度依存性を図 6-8 に赤線で示した。また、O がほぼ等しくなるように  $\text{CO}_2/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$  を混合した場合 ( $\text{CO}_2 10\text{mol}\%/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O} 90\text{mol}\%$ ) と、F がほぼ等しくなるように混合した場合 ( $\text{CO}_2 80\text{mol}\%/\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O} 20\text{mol}\%$ ) の換算臨界電界を計算し、その結果をそれぞれ黒線および青線で示している。この場合の C, O, F の過剰分 (マイナスは不足分) は  $\text{CO}_2/\text{PTFE}$  ガスの C, O, F に対して、前者ではそれぞれ -6.1%, 1.0%, 3.3% であり、後者ではそれぞれ -6.0%, 20.9%, 0.7% である。

同図において、三通りの特性はほぼ一致しており、換算臨界電界には原子の過不足の影響はほとんどないと言える。したがって、CとOとFの三種類の原子から構成されている高温ガスにおいて、三種類のうち一種類の原子のモル分率がほぼ等価になるように混合すれば、推定される換算臨界電界は類似した特性となることが明らかになった。

なお、温度 300 K-1000 K の範囲では、CO の衝突電離反応の違いが換算臨界電界の違いに影響を与えており、温度 3000 K-4000 K の範囲では、CF の電子付着反応の違いが換算臨界電界の違いに影響を与えていることがわかっている。

## 6.8 おわりに

本章では、 $\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{C}_3\text{F}_{10}\text{O}$  混合ガスと PTFE 溶発蒸気( $-\text{C}_2\text{F}_4-$ )が混入した  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  混合ガスにおいて、どちらも同種の原子から構成されていることに着目し、アーク放電に伴う熱解離後の原子のモル分率が等価になる条件を求め、高温状態における粒子組成ひいては臨界電

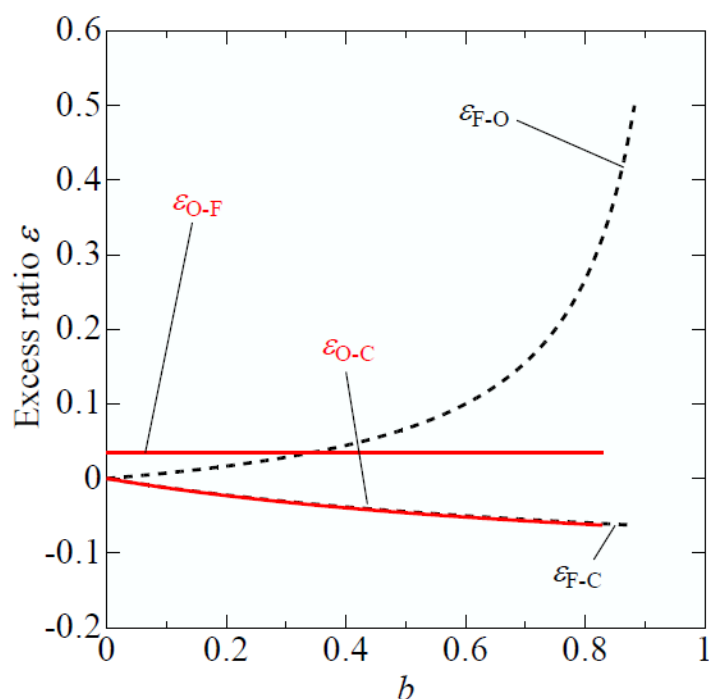


図 6-7 三種類の原子のモル分率のうち一種類のモル分率が等しくなるように混合した場合におけるそれ以外の原子の過不足割合



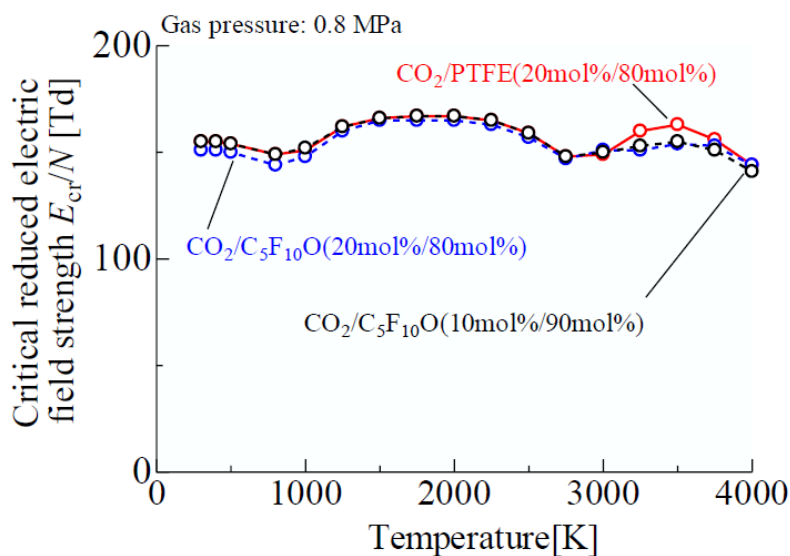


図 6-8 一種類のモル分率がほぼ等しくなるように混合した場合における換算臨界電界

界が二つの混合ガスで等価になるかを調査した。その結果、常温状態において異なる混合ガスであっても、熱解離後における構成粒子のモル分率が等しければ、冷却過程で再結合により生成される粒子組成ひいては導出される臨界電界が完全に等しくなることを明らかにした。また、各原子種のモル分率が完全に等しくならない条件においては、三種類の原子のうち一種類の原子のモル分率が等価であれば、その絶縁特性が類似となることを明らかにした。

これらの検討より、高温ガス冷却過程において再結合により生成される粒子種は、原子の供給元に依存せず、高温ガス中の原子の種類とその数により一意に定まると考えられる。

本研究の成果は、ガス遮断器における PTFE ノズルの溶発現象を利用することで、液化リスクの問題から使用が制限されている C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O の混入量が少量もしくはゼロでも C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混入時と同等の遮断性能を得ることができる可能性を示唆している。

## 第 6 章の参考文献

- [1] P. C. Stoller, M. Seeger, A. A. Iordanidis, and G. V. Naidis: “CO<sub>2</sub> as an Arc Interruption Medium in Gas Circuit Breakers”, IEEE Transactions on plasma science, Vol.41, No.8 (2013)
- [2] T. Uchii, Y. Hoshina, H. Kawano, K. Suzuki, T. Nakamoto and M. Toyoda: “Fundamental

- Research on SF<sub>6</sub>-free Gas Insulated Switchgear Adopting CO<sub>2</sub> Gas and Its Mixture”, Proceedings of International Symposium on Eco Topia Science 2007, ISETS07, pp. 516-520 (2007)
- [3] Y. Yokomizu, K. Ito and T. Matsumura: “Approach to Decaying Process of Arc Conductance after Current Zero on the Basis of Thermodynamic and Transport Properties of High Temperature Gases” , IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol. 123, No. 4, pp. 450-456 (2003) (in Japanese).
- [4] T. Matsumura, I. Morooka, Y. Yokomizu and M. Suzuki: “Arc Parameters in CO<sub>2</sub>-Blast Quenching Chamber with High-Pressure Storage Tank of Different Pressures”, Vacuum, Vol. 80, pp. 1305-1310 (2006).
- [5] H. Sun, M. Rong, Y. Wu, Z. Chen, F. Yang, A. B. Murphy and H. Zhang: “Investigation on critical breakdown electric field of hot carbon dioxide for gas circuit breaker applications”, J. Phys. D: Appl. Phys. 48, 055201 (2015)
- [6] M. Rong, H. Sun, F. Yang, Y. Wu, Z. Chen, X. Wang and M. Wu: “Influence of O<sub>2</sub> on the dielectric properties of CO<sub>2</sub> at the elevated temperatures”, Physics of Plasmas 21, 112117 (2014)
- [7] X. X. GUO, J. Y. XIONG, X. W. LI, B. X. LI and L. CHEN: “Dielectric Properties of Hot C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O and Its Mixture with CO<sub>2</sub> at The Elevated Temperature”, Proceedings of the 22nd International Conference on Gas Discharges and Their Applications, A-24, pp.139-142 (2018)
- [8] P. C. Stoller, C. B. Doiron, D. Tehlar, P. Simka, N. Ranjan: “Mixtures of CO<sub>2</sub> and C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O Perfluoroketone for High Voltage Applications”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 24, No. 5, pp. 2712-2721, October (2017)
- [9] 出村 文俊, 出村 雄樹, 田中 康規, 中野 裕介, 上杉 喜彦, 石島 達夫: 「混合割合を変更した CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O の熱力学・輸送特性と減衰アーク特性の数値解析」, 電気学会, 放電・プラズマ・パルスパワー・開閉保護研究会資料, EPP-19-113, SP-19-35, HV-19-98 (2019)
- [10] E. A. Egüz, A. Chachereau, A. Hösl and C. M. Franck: “Measurements of Swarm parameters in C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N:O<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>, C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O:O<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub> and C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O:O<sub>2</sub>:N<sub>2</sub> Mixtures”, The 19 th International

Symposium on High Voltage Engineering (2019)

- [11] Z. Xiaoling, J. Juntao, X. Dengming: “Breakdown Electric Field of Hot 30%  $\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$  Mixtures at Temperature of 300-3500 K During Arc Extinction Process”, *Plasma Science and Technology*, Vol. 18, No. 11, (2016)
- [12] 新開裕行, 神足将司, 三坂英樹, 足立和郎: 「 $\text{SF}_6$  代替ガスとしての 3M<sup>TM</sup> Novec<sup>TM</sup> 絶縁流体の基礎絶縁性能および分解生成物の毒性に関する検討」, 電力中央研究所報告, H17009, 2018年6月



## 第7章 総括

### 7.1 本論文の成果

地球温暖化は世界規模の現象であり、解決すべき重要な問題である。地球温暖化の進行を食い止めるためには、温室効果ガスの削減が非常に有効である。電気工学の分野においても環境に優しい技術の開発・研究が熱心に取り組まれている。特に再生可能エネルギーを活用する発電方式は、CO<sub>2</sub>を排出しない方法として注目されている。とりわけ、太陽光発電(PV)は、他の発電方式と比較して個人での導入が簡単であることや政府からの補助金が出たことから、急速に普及した。しかしながら、PV装置が大量に導入されるようになると、従来までの電力系統では想定していない様々な問題が発生し始めた。特に、PV装置連系点までの線路長が長距離になった場合には、PV装置連系点の電圧が上昇・低下するような事象が発生し、この具体的なメカニズムは明らかになっていなかった。本論文は、配電用変電所の直近に電氣的負荷が集中して存在し、配電線路の末端に大容量PV装置が連系され、線路途中に負荷がない長距離配電系統を対象として検討した。

まず、第2章では、PV装置連系点電圧のPV装置からの出力電流依存性に関して、電圧・電流ベクトル図上で定性的に説明できることを明らかにした。さらに、PV装置連系点電圧ベクトルの軌跡を分析することにより、PV装置からの出力電流増加時におけるPV装置連系点電圧の上昇・低下のメカニズムを明らかにした。また、PV装置連系点電圧のPV装置出力電流依存性に関する表式を示すことができた。これにより、設置できるPV装置の容量には限界があることを明らかにした。

第3章では、大容量PV装置からの出力電力、配電用変電所に流入する電力および線路損失が第2章で導出したベクトル図上の三角形の面積に比例して表されることを明らかにし、出力電流および線路距離の関数としてこれらの電力を定式化した。これにより、PV装置からの出力電力が最大となる条件(PV装置に許容される最大電力)、および配電用変電所に流入する電力が最大となる条件を定性的かつ定量的に明らかにできた。さらに、PV装置の出力電力を最も効率的に利用できる条件について明らかにした。具体的には、PV装置からの出力電力がある一定の大きさになるまでは、配電用変電所に流入する電力もPV装置の出力電力に比例して増加していくが、ある程度PV装置の出力電力が大きくなると、配電用変電所に流入する電力は減少することが明らかとなった。このように、配電用変電所に流入する電力が減少していく範囲では、PV装置の出力電力の

増加分は全て線路損失として消費されるようになる。したがって、PV 装置の出力電力最も効率的に利用できる条件は、PV 装置からの出力電力が最大となる条件ではなく、配電用変電所に流入する電力が最大となる条件を採用すべきであること明らかにした。

さらに、第 4 章では、PV 装置連系点電圧だけでなく、配電線路に沿った電圧分布の PV 装置からの出力電流・出力電力・線路長依存性に関して、ベクトル図上で表せることを明らかにした。したがって、PV 装置連系点電圧だけでなく、線路途中の電圧に関しても、電圧の上昇・低下のメカニズムを明らかにすることができた。電線に太い線材を使用した場合には、PV 装置の出力電力に対する線路途中の電圧および PV 装置連系点電圧の上昇が抑制できることが明らかとなった。

第 5 章と第 6 章では、地球温暖化を抑制するための別のアプローチ方法として、地球温暖化への影響が CO<sub>2</sub> の 25,200 倍である SF<sub>6</sub> ガスの使用量を削減ひいてはゼロにするための研究成果を述べた。SF<sub>6</sub> ガスは主に電力用ガス遮断器やガス絶縁開閉装置などに用いられている。SF<sub>6</sub> ガスの代替ガスとして CO<sub>2</sub> ガスおよび CO<sub>2</sub> をベースとして用いた混合ガスが候補に取り上げられている。これらのガスの常温における絶縁特性は解明されてきたものの、電流遮断過程で発生するアーク放電によって高温状態になったガスの絶縁特性は十分に明らかになっていない。そこで、第 5 章では、アークによってガス遮断器のノズル材料である PTFE の溶発した蒸気が CO<sub>2</sub> ガスに混入した際の誘電的破壊特性を明らかにした。その結果、PTFE 溶発蒸気が 20%および 40%混入した場合には、純粋 CO<sub>2</sub> ガスよりも絶縁性能が低下する条件があるものの、60%以上混入した場合には、純粋 CO<sub>2</sub> ガスよりも絶縁性能が向上することが明らかになった。これは、CO<sub>2</sub> ガス遮断器においては、遮断能力が向上することが期待できる。

SF<sub>6</sub> の代替ガスとして、CO<sub>2</sub> ガス単体ではなく、CO<sub>2</sub> ガスに人工系ガスである C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O を混入させることで絶縁性能が向上することがわかっている。しかしながら、C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O は沸点が高く、使用環境の温度によっては液化してしまうことが危惧されている。第 6 章では、CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスと PTFE 溶発蒸気が混入した CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合ガスとが同じ原子から構成されていることに着目し、これらのガスが高温により一度解離した後の特性に関して、等価になる条件の導出に成功した。これにより、ガス遮断器における PTFE ノズルの溶発現象を利用することで、液化リスクの問題から使用が制限されている C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O の混入量が少量もしくはゼロでも C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混入時と同等の遮断性能を得ることができる可能性を示せた。

## 7.2 新たな課題と今後の展望

本論文では、地球環境に優しい電力システムの構築に関係する二つのテーマに取り組み、それぞれにおいて、環境低負荷形電力システムの構築に貢献できるような重要な知見が得られた。

それぞれのテーマに対して、本研究の遂行により新たに発掘された課題や今後の展望について述べる。

### 7.2.1 大容量 PV 装置が接続された配電系統の研究に対する今後の課題

大容量 PV 装置が配電系統の末端に 1 台のみ接続された場合の PV 装置連系点電圧や配電用変電所の電圧、さらには、PV 装置から出力される最大許容電力などを定性的・定量的に示せた。また、負荷は配電用変電所近傍のみに接続されているものとし、負荷の影響は検討していない。そこで、次のステップとして、複数台の PV 装置および負荷が分散導入された場合の詳細な検討が必要である。さらに、配電線路に沿った電圧分布を明らかにできたことから、配電線路に設置する電圧制御機器の制御方法や必要な機器の台数に関して具体的な議論が必要である。

### 7.2.2 SF<sub>6</sub> 代替ガスの探索の研究に対する今後の課題

SF<sub>6</sub> の代替ガスとして、有力な候補のうちの一つである CO<sub>2</sub> ガスに焦点を当てて、PTFE 溶発蒸気が混入した CO<sub>2</sub> ガスの絶縁特性を明らかにした。また、人工系ガスである C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O の適用に関して、CO<sub>2</sub> ガスに PTFE 溶発蒸気が混入することにより同等の性能が得られることを示せた。ここで、本論文により解析された結果と実測結果とを照らし合わせて評価することが一番の課題である。本論文では、高温ガスが局所熱平衡状態であるとの仮定から算定された粒子組成を利用しているが、遮断後の残留ガスが比較的低温な場合においては、局所熱平衡状態が成立していない可能性があるとの指摘がある。さらに、本論文で考慮した粒子以外の多原子分子が存在するという指摘もある。したがって、今後の課題として、非熱平衡状態の影響や本論文で考慮しなかった多原子分子の影響を明らかにする必要がある。これらの課題の解決のためにもまずは実測結果との整合性に関して議論することが非常に重要となる。

本論文の第 6 章で述べた代替ガスの等価性に関する研究では、たとえ多原子分子などが考

慮され、粒子組成が変わったとしても等価性には影響を与えないと考えられる。一方で、第5章で述べたような、換算臨界電界の計算結果には影響を与える可能性があるため、どのような粒子種を採用すべきかに関しては今後の検討が必要である。

さらに、本論文の成果に加えて、熱的破壊領域に関する検討を行い、アークとアーク周辺を含めた領域の温度分布や導電率が定量的に明らかになれば、遮断器における電流遮断の成否を判断する研究への発展が期待される。



## 謝辞

本研究の遂行,ならびに本論文の作成にあたり,多くの御指導を賜りました愛知工業大学 工学部 電気学科 松村年郎教授(現在,愛知工業大学非常勤講師,名古屋産業科学研究所上席研究員)および愛知工業大学 工学部 電気学科 雪田和人教授に厚く御礼申し上げます。

また,本論文の作成にあたり,有益なる御助言と御指導を賜りました愛知工業大学 工学部 電気学科 大久保仁教授,鈴置保雄教授,七原俊也教授に深く感謝申し上げます。

さらに,学術論文の執筆にあたり,多くの御助言を賜りました名古屋大学 工学研究科 横水康伸教授に深く感謝いたします。

研究の遂行にあたって,協力していただいた愛知工業大学 大学院工学研究科 博士前期課程 電気・電子工学専攻 塚本真澄さん(平成30年4月～令和2年3月在籍),同,横井俊哉さん(平成31年4月～令和3年3月在籍),同,磯部由佳さん(令和2年4月～令和4年3月在籍),同,倉橋潤さん(令和3年4月～令和5年3月在籍予定)に感謝の意を表します。

最後に,平成29年度から令和3年度までの間,愛知工業大学 工学部電気学科 松村研究室でお世話になりました先輩・同期生・後輩の一同に感謝いたします。



## 公表した研究成果

### 1. 学術論文

(1) Toshiro Matsumura, Masumi Tsukamoto, Akihiro Tsusaka, Kazuto Yukita, Yasuyuki Goto, Yasunobu Yokomizu, Kento Tatewaki, Daisuke Iioka, Hirotaka Shimizu, Yuuki Kanazawa, Hiroyuki Ishikawa, Akimori Matsuo and Hideki Iwatsuki, “Line-end Voltage and Voltage Profile along Power Distribution Line with Large Power Photovoltaic Generation System”, Hindawi International Journal of Photoenergy, Volume 2019, Article ID 1263480, 8 pages (2019), <https://doi.org/10.1155/2019/1263480>

(第2章および第4章)

(2) Akihiro Tsusaka, Masumi Tsukamoto, Yuka Isobe, Toshiki Nakao, Toshiro Matsumura, Kazuto Yukita, Yasuyuki Goto, Yasunobu Yokomizu, Daisuke Iioka, Hirotaka Shimizu, Hideki Iwatsuki, Yasuyuki Kunii, Hirokazu Uenishi, Hiroyuki Ishikawa, Takayuki Fukae, Yuto Mineta, Yuki Kanazawa, “Maximum Allowable Output Power and Optimum Capacity of PV Generator in Power Distribution System under Constant Output Power Control of Power Conditioning System”, IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, IEEJ Trans 2021; Vol.16, Issue3, pp.392–401, Published online in Wiley Online Library ([wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)). DOI:10.1002/tee.23309

(第2章および第3章)

(3) Akihiro Tsusaka, Toshiya Yokoi, Toshiro Matsumura, Kazuto Yukita, Yasuyuki Goto, Yasunobu Yokomizu, “A Study on Dielectric Properties of High Temperature CO<sub>2</sub> Gas Contaminated with PTFE Vapor at 0.8 MPa”, 電気学会論文誌 B, Vol.141, No. 11, pp.656-665(2021) <https://doi.org/10.1541/ieejpes.141.656>

(第5章)

### 2. 国際会議

(1) Toshiya Yokoi, Akihiro Tsusaka, Toshiro Matsumura, Kazuto Yukita, Yasuyuki Goto and

Yasunobu Yokomizu, “A Study on Breakdown Properties of High Temperature CO<sub>2</sub> Gas Contaminated with PTFE Vapor”, Proc. of the International Council on Electrical Engineering Conference 2019 (ICEE2019), ICEE19J-128, Hong Kong (2019)

(第 5 章)

- (2) Toshiya Yokoi, Akihiro Tsusaka, Toshiro Matsumura, Kazuto Yukita, Yasuyuki Goto and Yasunobu Yokomizu, “Dependence of Critical Electric Field Strength in High Temperature CO<sub>2</sub> gas on Contamination of PTFE Vapor”, Proc. of the 2019 5th International Conference on Electric Power Equipment -Switching technology (ICEPE-ST), B-2-4, Fukuoka Japan (2019)

(第 5 章)

- (3) Toshiya YOKOI, Akihiro TSUSAKA, Toshiro MATSUMURA, Kazuto YUKITA, Yasuyuki GOTO and Yasunobu YOKOMIZU, “Dependence of Critical Electric Field Strength in High Temperature CO<sub>2</sub> gas of 2,000K on Contamination of PTFE Vapor”, Proc. of the International Conference on Materials and Systems for Sustainability, 2019(ICMaSS2019) ,A7-P-24, Nagoya Japan (2019)

(第 5 章)

- (4) Toshiya Yokoi, Akihiro Tsusaka, Toshiro Matsumura, Kazuto Yukita, Yasuyuki Goto and Yasunobu Yokomizu, “Influence of O<sub>2</sub> Gas Mixture on Critical Electric Field Strength in CO<sub>2</sub> Gas Contaminated with PTFE Vapor of 40 %”, The 13th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials (IAPS2020), Plasma Application & Hybrid Functionally Materials Vol. 29, EX2 P76, Osaka, Japan(2020)

(第 5 章)

- (5) Yuka Isobe, Akihiro Tsusaka, Toshiro Matsumura, Kazuto Yukita, Toshiya Nanahara, Yasuyuki Goto, Yasunobu Yokomizu, Hiroataka Shimizu, Daisuke Iioka, Hideki Iwatsuki, Yasuyuki Kunii, Kousuke Hamada, Yuya Mizuno, Takayuki Fukae and Manabu Yoshie, “A study on Effective Usage of Active Power Generated by Large Capacity PV Systems Connected to Distribution System”, The International Council on Electrical Engineering(ICEE) Conference2021, S3-202103140000010, Online meeting.

(第 3 章)

### 3. 口頭発表

- (1) 津坂亮博, 横井俊哉, 松村年郎, 雪田和人, 後藤泰之, 横水康伸, 「0.8MPa における

PTFE 溶発蒸気が混入した高温 CO<sub>2</sub> ガスの臨界電界に寄与している主要衝突反応」, 放電・プラズマ・パルスパワー/開閉保護/高電圧 合同研究会資料, EPP-19-135, SP-19-57, HV-19-120, pp.55-60 (2019)

(第 5 章)

- (2) 津坂亮博, 倉橋潤, 横井俊哉, 松村年郎, 七原俊也, 雪田和人, 後藤泰之, 横水康伸, 「高温 CO<sub>2</sub> ガスおよび CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合ガスの臨界電界に対する C<sub>3</sub>F<sub>10</sub>O ガスの添加効果と PTFE 蒸気混入効果の等価性に関する検討」, 放電・プラズマ・パルスパワー/開閉保護/高電圧 合同研究会資料, EPP-21-098, SP-21-039, HV-21-086, pp.37-42(2021)

(第 6 章)

- (3) 津坂亮博, 横井俊哉, 松村年郎, 七原俊也, 雪田和人, 後藤泰之, 横水康伸, 「PTFE 溶発蒸気が混入した CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合ガスの衝突電離・電子付着反応 -3,000K, CO<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=0.8:0.2 の場合-」, 令和 3 年電気学会全国大会論文集 WEB27-A3-6-050(2021)

(第 5 章)

- (4) 津坂亮博, 倉橋潤, 松村年郎, 七原俊也, 雪田和人, 後藤泰之, 横水康伸, 「高温 CO<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 混合ガスと PTFE 溶発蒸気が混入した CO<sub>2</sub> ガスとの類似性に関する検討」, 令和 4 年電気学会全国大会論文集 6-034(2022)

(第 6 章)