J. Inst. Electrostat. Jpn. 技術レポート

# 新潟県中越沖地震による発電所内変圧器火災の原因調査

田村裕之\*,1

(2008年8月20日受付; 2008年12月1日受理)

Investigation Results on the Causes of the Fire at the Transformer in the Power Station due to the Niigata Chuetsu Oki Earthquake Hiroyuki TAMURA\*,1

(Received August 20, 2008; Accepted December 1, 2008)

The Niigata Chuetsu Oki Earthquake (M6.8) occurred on July 16, 2007. In Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station, a fire occurred at the House Transformer 3B of Unit No.3. We report the outline of the fire at the House Transformer and the causes of the fire. The main contents are as follows.

At the House Transformer 3B, because the secondary bus ducts of the transformer was subsided against the foundation of the transformer, the secondary bus ducts ruptured. Then the bushing of the secondary side of the transformer ruptured, and the insulated oil leaked out the inside of the connecting ducts. And the duct contacted to the connecting terminals, arc discharge occurred between the connecting ducts and the connecting terminals in the duct. The insulated oil leaked ignited by the heat of arc discharge.

1. はじめに

平成19年7月16日10時13分頃に新潟県上中越沖(北緯37 度33.4分,東経138度36.5分,深さ約17km)を震源として発生 したマグニチュード6.8の地震に伴い,新潟県柏崎市の東京電 力株式会社柏崎刈羽原子力発電所内の3号機タービン建屋所 内変圧器3Bにおいて鎮火までに約1時間50分を要する火災が 発生した.この火災について,消防法第35条の3の2の規程に より,柏崎市消防本部消防長から消防庁長官へ行われた火災原 因の調査の要請に基づき我々は調査を実施した.

ここでは,調査結果をもとにした変圧器火災の概要と出火の推 定原因について報告する.

#### 2. 火災と変圧器の概要

出火施設は、柏崎刈羽原子力発電所の3号機タービン建屋南 側屋外の所内変圧器3B(以下,「変圧器」という。)である.なお, ここでの「所内」とは、発電所内で発生させた電力を施設内で使う ために用意された装置という意味である.

変圧器周りは図1のような配置になっていて,図1の左に 変圧器,中央上部の奥に防火壁,中央から右方向に変圧器二 次側のダクトが伸び,図1のさらに右方向にあるタービン建 屋につながっていた.図1の点線で囲まれた部分に焼損がみ られた.

出火した変圧器は、タービン発電機の発生電力の一部を所内 動力用の電源として使用するため、発電機と主要変圧器の間か ら分岐して、一次側18,988 kVを二次側6.9 kVにする降圧用変 圧器である<sup>1)</sup>. 変圧器は、三相のΔ-Y結線であり二次側中性点 が接地されている.二次側には3相2系統で出力され、上段およ び下段のダクトが接続されている.変圧器内部には絶縁油(消防 法第4類第3石油類)が約 17,000 L 封入されている.変圧器二



図1 所内変圧器の外観

Fig. 1 Overview of the house transformer 3B.

キーワード:変圧器,火災,アーク放電,電極溶損,絶縁油 \*総務省消防庁消防大学校消防研究センター(182-8508 東

京都調布市深大寺東町 4-35-3) National Research Institute of Fire and Disaster Japan, 4-35-3, Jindaiji-higashimachi, Chofu, Tokyo 182-8508, Japan <sup>1</sup> tamura@fri.go.jp

次側は、図1のように「ダクト接続部」を経て「二次側接続 ダクト」に繋がり、図1のさらに右方向にあるタービン建屋 へと伸びている.なお、変圧器二次側のダクトの接地の状況と しては、図1および図4にあるようにダクト接続部および二次側 接続ダクトに接地線があったこと、東京電力の事故対策としてダ クト内部に絶縁シートを取り付ける工事をしている<sup>20</sup>こと、東京電 力株式会社立地地域部広報グループから接地抵抗はほとんど ゼロとの回答を得たことなどから、火災当時のダクトは接地がとら れていたと考えられる.

# 3. 焼損状況

図1の点線の中に焼損が見られ,点線内の変圧器,接続 ダクト,防火壁について検討する.

### 3.1 変圧器の焼損状況

変圧器で焼損が激しいのは変圧器二次側のダクト側で,一 次側は,端子および接続配線に焼損は見られなかった.また,



図2 ダクト接続部と溶融でできた穴

Fig. 2 The connecting ducts and the holes made by melting.

変圧器本体の放圧装置は放圧板に破損は見られず内部圧力の 極端な上昇はなかったと考えられる.火災後に確認した変圧 器付属の温度計表示によれば、変圧器の一次側巻線温度,二 次側巻線温度および絶縁油温度の最高温度はそれぞれ 95℃, 96℃および 92℃であった.この温度計は、メータ内で針が振 れたときに最高温度のところにマーカーが残るタイプである. マーカーが最高温度になった時期は不明だが、火災後の調査 時に確認した値なので、火災の期間を含んだ期間での最高温 度と考えられる.絶縁油は引火点(130℃<sup>3)</sup>)および発火点 (250℃<sup>3)</sup>)まで上昇していなかった.これらのことから変圧 器内部からの出火はなかったと考えられる.

#### 3.2 接続ダクトの焼損状況

上段および下段ダクトともにダクト接続部が破損し図1のように 上下にずれていた.上段および下段ダクトともにダクト接続部周 囲は焼損が激しく、塗料が焼失し地金が露出していた.

図1の二次側のダクトがつながるタービン建屋方向の上方 からダクト接続部上面付近を写した写真を図2の上図に示す. 図2の下図は下段のダクト接続部の側面を写したものである. ダクト接続部の上面および側面に楕円形の溶融した穴が開い ていた.下段のダクト接続部は図3のように内部の焼損が激 しく、ダクト接続部の内部にはアルミニウム電極板が溶けた と思われる銀色の溶融した金属らしき物質および黒い油状の 付着物が確認できた.以上のように、ダクト接続部の内部は 激しく燃えた状況を呈していた.

#### 3.3 防火壁の焼損状況

防火壁に焼損が見られるのは変圧器に面した側のみであり, ダクト接続部の高さ付近を中心に黒く変色し、コンクリート表面が 剥離していた.防火壁は炎にあぶられた状況であった.

# 3.4 出火箇所の推定

出火箇所は, 3.1 節から 3.3 節のことから, 変圧器の本体と防火 壁からの出火は考えにくい. 最初に出火したのが上段および下 段のどちらかは判定出来ないが, 焼損の激しい変圧器二次側の ダクト接続部であると考えられた.

#### 4. 地震動による破損状況

焼損の見られる変圧器および変圧器接続ダクトに地震動が 与えた影響について検討する.

#### 4.1 接続ダクトの破損

二次側のダクトは二次側接続ダクトが変圧器側のダクトに比べ 下方にずれている(図1参照).そのため、ダクト接続部でダクト が上下にずれ破損している.

#### 4.2 二次側ダクト基礎部の沈下

図4のように変圧器基礎部分は下方約20 cm が変色していな かったことから、変圧器の基礎の周りにある二次側ダクトを支えて いた基礎が乗る地盤面が約20 cm 沈下していることが考えられ



図 3 下段ダクト接続部の内部 Fig. 3 Inside of the lower connecting duct.

た. タービン建屋側を見たときも二次側ダクトを支えていた基礎 が乗る地盤面が約28 cm 沈下していた.

各施設の基礎構造を述べる.3号機タービン建屋は岩盤に 乗るように建てられ、変圧器の基礎は鉄管杭が岩盤まで打ち 込まれていた.一方、二次側ダクトを支持する基礎は地表に コンクリートを流し込み作られた基礎で、岩盤までの支持部 材はなかった.これら基礎構造の違いにより、二次側ダクト を支持する基礎は、地震動による地盤沈下で変圧器やタービ ン建屋に比べ20 cm 以上沈下したと考えられる.

#### 4.3 二次側ブッシングの破損

上段ダクト接続部の二次側ブッシングは覗き込むことができず 確認できなかったが,下段ダクト接続部の二次側ブッシングは, 図 5 の円破線内のように碍子部分が破損しているのが確認でき た. ブッシングの碍子が破損したことにより後述する変圧 器内絶縁油の噴き出しにつながったと考えられる.

4.1 節から4.3 節より次のように考える. 二次側ダクトを支持する 基礎は岩盤まで支持部材がない構造であった. 地震動の影響に より二次側ダクトの基礎はタービン建屋と変圧器に比べ沈下した. その結果二次側ダクトの高さが相対的にタービン建屋と変圧器 から下がり, ダクト接続部のダクトや二次側ブッシングの破損が起 こったと考えられる.

### 5. 絶縁油の漏えい

#### 5.1 油の漏えい状況

変圧器と3号機タービン建屋を繋ぐ下段ダクト接続部から垂れ ている油が確認できた.油は、ダクト接続部の内部から二次側ダ クトの基礎部分および地盤面に垂れ流し状態であった.

#### 5.2 漏えい物質の推定

漏えい物質は、ダクト接続部から漏えいしたものである. 変圧 器および二次側ダクトの内部で使用されていた油類は、変圧器 内部に封入されていた高圧絶縁油のみである. ゆえに、ダクト接 続部から垂れている油はこの絶縁油であると考えられる.



Lower Connecting Duct

図4 地盤沈下の状況

Fig. 4 The situation of the subsidence.

### 5.3 漏えい発生状況の推定

4.2 節に示したよう地震動と基礎構造の違いにより二次側接続 ダクトの基礎部分が20 cm以上沈下したことが考えられる.

ダクト接続部の構造を図 6 に示す.ダクト接続部の内面高さは 40 cm であり,この内部に設置されている碍子,接続電極および フレキシブル導体の上下方向の高さが15 cmである.これらはダ クト内の上下方向の中央に取り付けられていることから、ダクト接 続部内のダクト上面および下面と碍子,接続電極およびフレキシ ブル導体との距離は,12.5 cm である.この距離に対し,二次側 接続ダクトの基礎部分は20 cm 以上沈下している.また,地震に より上下方向に大きく振動したことは十分に考えられる.そのた め、碍子,接続電極およびフレキシブル導体がダクト接続部のダ クトと衝突したことが考えられる.上段ダクト接続部の二次側ブッ シングは高所のため確認できなかったが、下段ダクト接続部内部 の二次側ブッシングを見ると,4.3節で述べたように図5の円破線 内のように碍子部分の破損が確認でき、図5の四角破線内のよう に油の漏えい跡が確認できる.

5.1 節から 5.3 節より次のように考える.まず,地震動の影響により二次側ダクトを支持する地盤面が沈下した.次に, 上段および下段のダクト接続部内部で二次側ブッシングが接続ダクト内の壁面と接触して破損した.そして,変圧器内部 に封入されていた絶縁油が噴出したものと考えられる.

# 6. 発火源の検討

出火箇所が変圧器と二次側のダクトを繋ぐ上段および下段の ダクト接続部の内部であることから、ダクト外部からの着火および 放火の可能性は低いと考えられる.また、ダクト接続部内部には 二次側ブッシングから繋がる3相線および中性線のみでその他 発火源になりえるものがない.発火源として、二次側ブッシング から繋がる3相線間の短絡や地絡、ダクト破損に伴う衝撃火花、

The insulating oil leakage



The breakage of the bushing part

図5 下段ダクト接続部内部でのブッシングの破損と 絶縁油の漏れ

Fig. 5 The breakage of the bushing part and the insulating oil leakage in the lower connecting duct.

電極とダクトの接触による地絡に伴う大電流加熱,アーク放電な どの放電現象について検討する.

## 6.1 二次側ブッシングから繋がる3相線間の短絡

変圧器側の接続端子の上部の角や接続ボルトが溶融し丸み を帯びた状態に溶融しているが、3 相線に電気溶融痕は見られ ない.

二次側接続ダクトは水平方向への大きなずれおよび破損は見られなかったため、350mm間隔で設置されている3相の各導体は地震動による影響で接触する可能性は低い.

3 号機タービン建屋内の警報装置制御盤の表示を確認すると、 変圧器二次側の異常により中性点の零相電圧の上昇を検出して 警報を発する「所内変圧器3B地絡」の表示がなかった.零相電 圧は、変圧器の3相のうち、1相の地絡や2相間の短絡により上 昇する.3相間の同時短絡か3相の同時地絡が起こった場合は、 この警報は発生しない.警報表示によれば、二次側ブッシングか ら繋がる3相のうち、1相の地絡や2相間の短絡はなかったと考 えられる.

#### 6.2 ダクト破損に伴う衝撃火花

破損の見られるのはダクト接続部である. ダクト接続部はゴム 製ブーツで接続されており衝撃火花が発生する可能性は低い. 地震動の影響により衝撃火花が発生したと仮定した場合につい て考察する. 絶縁油の温度は3.1節に示したように92℃以下であ り, 引火点温度は超えていなかった. そのため, 絶縁油から揮発 する可燃性ガスに衝撃火花のみで着火させるには, 油温度を引 火点以上に暖める必要がある. 地震の揺れによる断続的な衝撃 火花により油温度を上げることは難しい. また, 内田らの実験<sup>4)</sup> でも示されているように, 金属の衝撃火花による可燃性混合気 の着火は必ずしも容易に起こるものではない. そのため, 衝撃



図6 二次側接続ダクト内部の構造

Fig. 6 The structure of the secondary bus ducts.

火花が絶縁油の着火原因になる可能性は低いと考えられる.

# 6.3 短絡や地絡に伴う大電流加熱およびアーク放電 などの放電現象

警報装置制御盤の表示で「所内変圧器3B地絡」の表示がな い条件で、変圧器の一次側過渡現象データ<sup>1)</sup>のように3相とも電 圧や電流が同じ変化をしたということは、変圧器二次側の電極部 分で、3相の同時短絡および地絡が発生したことが考えられる.

図 2 のようにダクト外周部に穴の開いた状況になっている.また,図3のように下段ダクト接続部内の変圧器側は接続端子の上部の角や接続ボルトが溶融し丸みを帯びた状態であり,ダクト内のアルミニウム電極板は溶融していて確認できない.

変圧器二次側の電極は、銅板、銅のフレキシブル平編導線、 アルミニウム板で構成されている.変圧器二次側のダクトは鋼製 である.電極素材の融点は、銅が約 1,084℃、アルミニウムが約 660℃である.ダクト素材の融点は、ダクト素材の組成情報は不 明だが物性値を引用する素材を鉄とすると約 1,536℃である<sup>5</sup>.

変圧器二次側ダクトにできた穴と、変圧器二次側電極の溶融 が生成された要因として、絶縁油の燃焼による加熱、接続端子と ダクトの接触による地絡に伴う大電流加熱、アーク放電などの放 電現象などが発生したことが考えられる.以下にこれらについて 考察する.

(a) 絶縁油の燃焼熱による溶融

漏えいした変圧器絶縁油が燃焼したと仮定する. ダクト部分の 写真を見ると穴以外に大きな開口部がないので、ダクト内部はそ れほど空気の供給が良い条件ではなかったと考えられ, 絶縁油 が理想的に燃焼することはなかったと推定される. そのため, 絶 縁油が燃焼した場合 800~1,300℃になる のことが予想されるが, 低めの温度であったと推測する.この温度範囲では、アルミニウ ムの溶融と条件によって銅の溶融が考えられるが,鉄の融点に は至らない. 実際の鋼製ダクトは矩形を維持した状態で楕円状 に穴があいていることから,穴は燃焼熱で生成されたのではなく 別の要因によるものと考えられる.また,図3のように銅電極の接 続端子上部の角が丸く溶融したり,接続ボルトが丸く溶融してい るが,もし,この溶融が絶縁油の燃焼からの受熱による溶融であ れば、この付近の銅雷極のすべての角部分に溶融が見られるは ずであるが、実際には角の残った電極もある.このことから、銅電 極の溶融は燃焼熱によることよりも、アーク放電などによるものと 考えられる. ダクト内のアルミ電極は, 絶縁油の燃焼熱でも十分 溶けるため、絶縁油が1時間以上燃え続けていた際に溶融したと 考えられる.

アルミニウム電極の溶融はアーク放電および絶縁油の燃焼炎 にあぶられたためと考えられ, 鋼製ダクトや銅電極の溶融はアー ク放電に起因するものと考えられる.

(b)アーク放電による溶融

変圧器二次側ブッシングの破損がダクトとの衝突によって生じたと推定されることから、変圧器二次側電極とダクトは地震の揺れにより接触し、その後、両者の間で放電が発生したと考えられる.

変圧器一次側の電圧と電流の記録を表1に示す.表1は,東 京電力の発表<sup>1)</sup>のものと,表中の発電機遮断機が動作した後の2 秒から7秒までの記録については消防本部が東京電力より提供

#### 表1 変圧器一次側の電圧と電流の記録

Table 1The records of voltages and currents of theprimary side of the transformer

primary current	primary voltage
(kA)	(kV)
11.9	22.9
0	17.2
18.6	13.2
15.5	11.5
12.4	8.3
7.8	6.2
5.4	4.6
3.9	3.8
1.6	3.4
0	3.4
	primary current (kA) 11.9 0 18.6 15.5 12.4 7.8 5.4 3.9 1.6 0

#### を受けた記録とからなる.

表1でいったん電流が下がったあと,発電機遮断機動作後1.6 秒で電流値が大きくなっている.このことから1.5 秒後から1.6 秒 後の間に二次側で異常が発生したものと考えられる.異常発生 時の二次側の電圧を求める.表 1より1.5 秒後の変圧器二次側 の電圧は,変圧比(18,988 kV:6.9 kV)から計算すると6.25 kV と なるため,電極とダクトの接触により,その接点に大電流が流れ ジュール熱により高温となり電極の溶融が起こったと考えられる. また,表 1 のデータより接触時の変圧器二次側の電流を変圧比 から計算すると 51.2 kA となり,地絡の発生後,ダクトと電極が離 れたとしても変圧器二次側電極とダクトの間で大電流アーク放電 が開始されたと考えられ,kA 級の電気量であることから電極から 高速で金属蒸気が噴出するアークジェットも発生したと考えられ る.

アーク放電は、陰極および陽極の近傍の陰極点および陽極点 と、陰極点と陽極点の間の放電経路となる明るく輝く陽光柱から なる.陰極が鉄や銅、アルミニウムの場合、陰極点の温度は 2,000℃以上の高温に達する<sup>7)</sup>.また、陽光柱は、陰極点温度を 上回る数千 ℃以上の高温となる.

電極の溶損には、以下の二つの現象が考えられる.一つは、 kA 級の大電流アークによるアークジェットの発生、もう一つは、 アークが発生するとアーク電流の通過電気量に概ね比例すると されている電極金属の溶損である<sup>8)</sup>.次にこの電極の溶損につ いて考察する.

アーク放電に使われた変圧器二次側の電気量を計算する.変 圧器一次側に相当する発電機電流は,表1のように発電機遮断 機が動作した時刻をゼロとして,1.6 秒後の18.6 kAが6秒後に ゼロになっている.1.6 秒後の変圧器二次側の電流は,先の計 算のように51.2 kA となり,これが6秒間で減少し0Aになってい る.この約6秒の間,アーク放電が継続したと考えられる.表1の ようにこの6秒間の電流変化はほぼ直線的に減少しているので, 流れた電気量は時間と電流の積になるため,おおよそ1/2×51.2 ×6 kAs となり,1相当り153.6 kAs となる.3相での合計は約460 kAs となる.この電気量からアークジェットとアークによる溶損量を 求める.

アークジェットによる銅電極の消耗量は,真空アークとすれば, 単位電気量(As)当り100 μg/As になる<sup>7</sup>ことがあるので,アーク ジェットによる消耗は,多く見積もると約46gとなる.

アークによる電極の溶損量は、アーク電流の通過電気量に概 ね比例することが知られている<sup>8</sup>. 放電継続時間が0.4sを例にとれ ば、鉄の場合、通過電気量が5kAsのとき約20gが溶損する<sup>8</sup>. 先 の計算のように3相での合計通過電気量は約460kAsとなるので、 電極が鉄とした場合、通過電気量が5kAsのとき約20gの溶損と すると、3相の合計では約1,800gとなる.

一方,ダクトの穴の大きさは、縦横の最大値で計測すると、

上段ダクト	上面	320 mm	×	170 mm	1箇所
	側面	120 mm	$\times$	140 mm	1箇所
下段ダクト	上面	220 mm	$\times$	170 mm	1箇所
	側面	130 mm	$\times$	145 mm	1箇所

となる. ダクトの板厚は 2.3 mm である. 穴の形状を楕円と仮定し, 鉄の比重を 7.874 として溶損した鉄の質量を計算すると, 合計で 約 1,800 g となる.

電気量のすべてが鉄の溶損に寄与したと仮定すると, 試算し た値と概ね近い値となる. ダクトの穴はアーク放電の溶損により 作られたと考えられる.

次に、ダクト内の変圧器二次側電極のアーク放電による溶損 を検討する.

銅電極は、放電継続時間が0.4 sを例にとれば、通過電気量が 5 kAs のとき約 30 g が溶損する<sup>8)</sup>. 銅電極の溶損量は、写真で確 認した範囲では目立って大きなものはないが、フレキシブル導体 を固定しているボルト固定部分の溶融が見受けられる.

アルミニウム電極は、絶縁仕切板の部分まで溶融している. 交 流電源におけるアルミニウム電極のアーク放電による溶損量<sup>9)</sup>は、 放電継続時間が 0.4 s を例にとれば、通過電気量が 5 kAs のとき 約 22 g である. 通過電気量がすべてアルミニウムの溶損に寄与 したとすると、約 1980 g となる. 溶融したアルミニウム板電極の質 量を計算する. アルミニウム板電極の厚みは 1.5 cm なので、図 4 から、アルミニウム板電極の長さは約 30 cm で、幅は 15 cm であり、 体積は約 675 cm<sup>3</sup>となる. アルミニウムの比重を 2.7 とすると電極 一本での重量は約 1,822 g となる.

ダクト内のアルミ電極は4極とも絶縁仕切板の部分まで溶融しているが、この溶損量の試算より、一部はアーク放電による溶損で、他の大部分は1時間以上継続した絶縁油の燃焼熱で溶融したものと推定する.

以上のダクト溶融穴の生成過程や電極の溶融過程の推定より、 変圧器二次側ダクト内でアーク放電が発生したと考えられる.

#### 6.4 発火原因の推定

現場の調査結果に基づいて考察した結果,発火原因は次の ように推定される.まず,地震動により変圧器二次側ダクト 内のブッシングや電極板がダクトの上下または左右の面と衝 突し,ブッシングを破損した.これにより上段および下段の 接続ダクト内への変圧器内絶縁油の噴き出しが始まった.ま た,これと同時期に地震動により上段および下段のダクト接 続部内の3相の電極がダクト内側部分と接触したことにより, 地絡および短絡による放電火花や電極が溶融するくらいの大 電流による発熱,2,000℃以上のアークを伴うアーク放電の発 生がダクト内で起こった.そして、ブッシングの破損により 噴き出していた絶縁油が主にアークの熱により発火したもの と考えられる.アーク放電が終了しても、絶縁油の噴出が継 続していたため、1時間以上にわたり燃焼が継続した.

#### 7. まとめ

平成19年7月16日に発生した新潟県中越沖地震による地震 動の影響で原子力発電所内の所内変圧器で火災が発生した.こ の火災の原因について報告した.

現場の調査結果を基に考察した結果は以下のとおりである. 変圧器の基礎と変圧器につながるダクトを支える基礎の構造が 違うため、地震動の影響で二次側ダクト部分が地盤沈下をした. ダクトと変圧器のブッシングが衝突してブッシングが破損し、変圧 器内部の絶縁油が噴出した.ブッシングが破損したのと同時に ダクト接続部内の電極がダクトに接触し、地絡および短絡に続き 放電が起こり、2,000℃以上のアーク放電がダクト内で発生したと 考えられる.そして、アークが発生したダクト内で、ブッシングの 破損により噴出していた絶縁油が着火したものと考えられる.

なお、現場調査には、柏崎市消防本部の皆様、東京消防庁 の笠原孝一氏と川崎市消防局の藤原正人氏の協力を頂いた. また、アーク放電の電極溶損について消防研究センター火災 原因調査高度支援専門員の浅野和俊山形大学名誉教授のご助 言を頂いた.ここに記し感謝の意を表します.

#### 参考文献

- 東京電力株式会社:「柏崎刈羽原子力発電所3号機所内変 圧器3Bの火災について(中間報告)」(平成19年8月23日),東京電力株式会社(2007)
- 2) 東京電力株式会社:「3 号機所内変圧器(B)のダクト火災に 関する原因と対策について」(平成 20 年 9 月 25 日),東 京電力株式会社 (2008)
- 3) 日本石油株式会社:商品安全データシート510020-24, p.3, 日本石油株式会社 (1994)
- 4) 内田早月,佐藤治海,井原濶:鉱山と保安, 31 (1985) 354
- 5) 国立天文台:「理科年表」平成17年, p.391, 丸善 (2004)
- 6) 日本火災学会監修:「火災と消火の理論と応用」, p.124, 東京法令出版 (2005)
- 7) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編:「放電ハンドブ ック上巻」, p.191-192, 電気学会 (1998)
- 8) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編:「放電ハンドブ ック上巻」, p.209-210, 電気学会 (1998)
- 9) 渋谷正豊, 稲葉次紀, 合田 豊: 電気学会論文誌 B, 113 (1993) 328