修　士　論　文

過電流時における電力ケーブルの燃焼性状に関する研究

平 成 ２７ 年 度

２０１６年３月

東京理科大学大学院

国際火災科学研究科 火災科学専攻

田坂　光司

指導教員　辻本　誠（工学博士）

Master's Thesis

The Study on Fire Behavior of Electrical Power Cables during Overcurrent Accidents

March 2016

Koji TASAKA

Supervisor: Dr. Makoto TSUJIMOTO

Department of Fire Science and Technology

Graduate School of Global Fire Science and Technology

TOKYO UNIVERSITY OF SCIENCE

The Study on Fire Behavior of Electrical Power Cables during Overcurrent Accidents

Koji TASAKA (K114613)

Keywords: Cable Tray Fire, Overcurrent, Fire Behavior, Prediction Method

In response to the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station on March 11, 2011, the Nuclear Regulation Authority (hereinafter NRA) was established as the new government office related to the nuclear regulation and nuclear security. After that, the NRA reviewed the old ones, and started to enforce the new regulation activities based on the renewal regulatory requirements, the regulatory policies and the review standards for commercial nuclear reactors and the supplementary facilities. Therefore, the review meetings for such installations continue between the NRA and the 9 electric power companies from 2013 until today.

In nuclear installations, one of the most important components to fire safety is electrical cable. Its function is to provide a medium for transmitting electrical energy (power, control or signals) between two points in a common electrical circuit. In general, it establishes as one group cables on cable raceways. Therefore, cable failure induces loss of continuity in the energy transmission path, and sometimes also cause a fire accident. For example, the lessons from the fire accident at Browns Ferry Nuclear Power Plant Unit 1 in 1975 are very useful to understand how the cable failure from an external heat flux induced a fire. A fire that initiates from a cable, either due to a fault in the cable or due to a current overload, is called a self ignited cable fire.

This thesis is focused on the fire behavior of electrical power cables. Especially, the overload cases are described from the experimental results of electrical power cables. These experiments were conducted by the Central Research Institute of Electric Power Industry entrusted from one of the electrical power companies in Japan. The primary objective of this series was to characterize the fire behavior of electrical cables. The secondary objective was to evaluate the functions of multi-fire protection systems, related to the detection and suppression of cable tray fires.

According to the experiments, the fire behavior of electrical power cables was confirmed that it depended on the cable construction parts and the cable voltage level. In the cases of high voltage power cable, the cable ignition induced by the gases which generated from the pyrolysis of the cable insulation. Meanwhile, low voltage cable had another mechanism; spontaneous ignition of the cable construction parts. More discussions provide in section 4.

Based on a certain hypotheses, a simple model for electrical cables also developed to predict a timing of ignition during overcurrent accidents. This model is essentially a numerical solution of the one dimensional heat conduction equation within a homogenous cylinder with fixed, temperature independent properties. The model predictions have been compared to experimental results of electric power cables, and the results indicate that the model partly has prediction accuracy.

過電流時における電力ケーブルの燃焼性状に関する研究

The Study on Fire Behavior of Electrical Power Cables during Overcurrent Accidents

田坂　光司（K114613）
Koji TASAKA (K114613)

１．研究の背景と目的

2013 年、我が国の原子力規制委員会(以下、NRA)は、従来の規制基準を抜本的に見直し、大幅に強化することで､原子力施設に対する新たな規制基準を定めた。それに伴い、NRA が実施する当該基準への適合性審査へ合格することは､原子力施設の再稼働に関する必要条件として､国内全ての原子力事業者へ課されることになった。したがって、近年では当該施設の火災防護に係る規制基準 [1)]への適合性審査に向けた対応として、審査時に提案する実施対策(既存と新規を含む)の有効性評価を目的とした、原子力事業者主導の火災試験が、国内で多数行われている。

その中でも本稿では、ケーブルの過電流火災を対象とし、原子力事業者等から情報提供を受けた既往の実証試験データ [2),3)]を詳細に分析することで、ケーブルの過電流火災の発生メカニズム、およびその燃焼性状を把握することを目的とする。加えて、ケーブルの内部温度上昇を予測する簡易な評価モデルを構築し、実証試験時の測定データを用いた検証を行うことで、ケーブルの過電流火災へ対する有効な評価手法、またはその方法論を提案することを最終目標とする。

２．電線とケーブルの基本構造

電線およびケーブルの構造については､それらの用途、機能、および性能などに依存した多様性を有している。したがって、以降ではそれらの代表として、高圧 CV(架橋ポリエチレン絶縁ビニルシース)ケーブル [註1] の基本構造を紹介する(図 1 参照)。

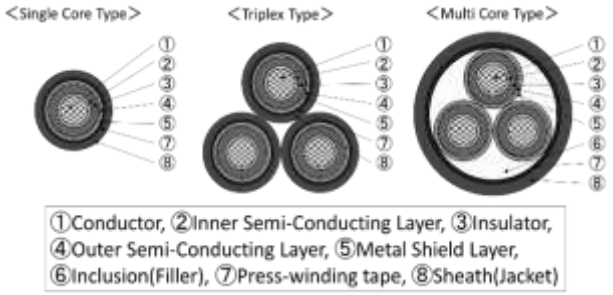


Fig.1 Cable construction parts (CV cable)

３．過電流に起因するケーブルの火災実証試験

この実証試験は、ケーブルの過電流火災へ対して、泡消火設備の有効性を評価することを目的に電力中央研究所が実施したものである [2),3)]。したがって、試験体としては、6.6kV 高圧電力ケーブルおよび 600V 低圧電力ケーブル(共に導体の断面積 100 ㎜ [2]，1 心)を選別し､それらを水平または垂直のラダー型ケーブルトレイへ敷設した状態で、目標値 2000 アンペアの電流を試験体に印加し､過電流時におけるケーブル火災を模擬している。なお、試験体へ印加する電流値については、過去の知見 [4)]に基づき、ケーブルの許容電流値の約 6 倍で設定している。また本実証試験では、ケーブルの発火位置を制御する等の観点から､試験体の周方向へ切込(高圧：24.7 ㎜，低圧：15 ㎜)を入れる措置が取られている。加えて、ケーブルの温度異常を検知するための検知線が S 字状に敷設されており、ケーブルの表面温度、切込部温度および近傍空気温、ならびに電流値等の測定が行われている。試験時における温度の測定点については、図 2 へ一覧として整理した。

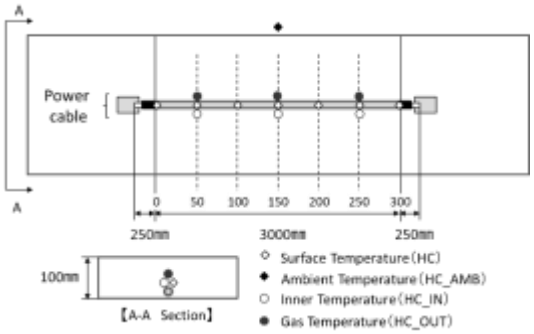


Fig.2 Arrangement of thermocouples

３．１　試験 H02（高圧電力ケーブル）の燃焼性状

試験 H02 について、実証試験の結果を詳述する。供試ケーブルに関して、絶縁体は「難燃性ポリエチレン」、シースは「難燃性低塩酸耐熱ビニル」で構成されており、前者は熱硬化性樹脂(発火点 410℃)、後者は熱可塑性樹脂(融点 212℃)である。

通電開始 340 秒に発煙、その約 90 秒後の 424 秒(切込位置 50)、および 427 秒(切込位置 150)にケーブルが発火、通電停止後に火勢は弱まるが、すぐには自己鎮火しないことを確認した。なお、ケーブルの切込部温度(HC_IN)が 206℃から 316℃の範囲で発火したことから､高圧電力ケーブルの過電流による発火機

構は、発生ガスの自己発火であると考えられる（図 3 および図 4 参照）。

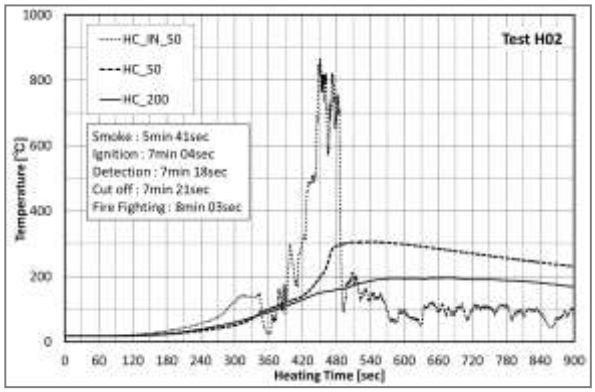


Fig.3 Thermal profiles of Test H02 (High voltage)

次に図 2 の各測定位置における温度の実測値について記述する(図 3 参照)。ここで HC_IN_50 はケーブルの切込部温度、HC_50 および HC_200 はケーブルの表面温度である。HC_IN_50 に着目すると、試験体への通電開始後、150 秒から徐々に温度が上昇し、310 秒までに 140℃へ到達した後、20 秒ほどその温度が継続する。その後、340 秒ごろにケーブルシースの破裂が発生し、一旦 30℃以下まで低下しているが、360 秒の辺りから再び温度が上昇し、424 秒で発火を確認した時、その温度は 316℃まで到達している(図 4 参照)。その後、通電を停止した 441 秒がピークで、483 秒の CO_2 消火器による手動消火の影響で、温度は急激に低下している。

一方、ケーブルの表面温度について着目すると、ケーブルが発火するまでは、各測定位置で同様の温度上昇履歴を示しているが、発火後の切込位置(50, 150, 250)とそれ以外(0, 100, 200, 300)では、両者の温度上昇履歴が明らかに異なっている。この点については、切込位置に燃焼が集中していたため、発火後に温度が急上昇している。また鎮火後の温度履歴が緩やかである点については、切込位置の燃焼に伴うケーブルシースの溶融等が確認されており、熱電対がケーブル絶縁体の付近まで埋没したことが原因であると思われる。

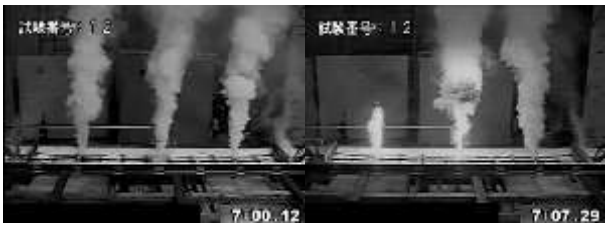


Fig.4 Snapshots from the video of Test H02

３．２　試験 H32（低圧電力ケーブル）の燃焼性状

試験 H32 について、実証試験の結果を詳述する。なお、供試ケーブルの構成材料に関しては、前述の高圧電力ケーブルと同様である。

通電開始 297 秒に発煙、その約 90 秒後の 434 秒(切込位置 100)にケーブルが発火し、その全長に亘って火炎が伝播、通電停止後に火勢は弱まるが、燃焼が継続することを確認した。またケーブルの近傍空気温(HC_OUT_50、HC_OUT_150、HC_OUT_250)が 200℃程度、表面温度(HC_100)が 496℃で発火したことから、低圧電力ケーブルの過電流による発火機構は、発生ガスの自己発火もしくは高温熱源(導体)による着火(引火)、またはケーブル絶縁体の自己発火もしくは高温熱源(導体)による着火(引火)である、と考えられる(図 5 および図 6 参照)。

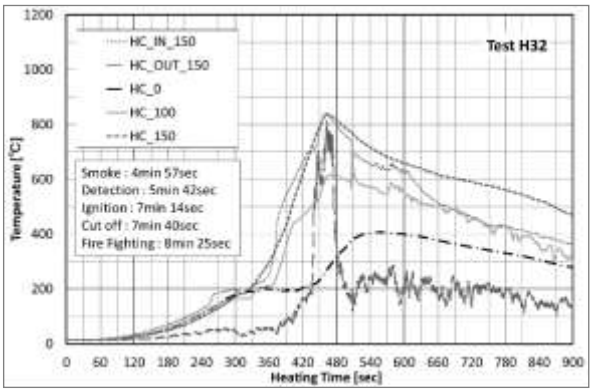


Fig.5 Thermal profiles of Test H32 (Low voltage)

Fig.6 Snapshots from the video of Test H32

次に図 2 の各測定位置における温度の実測値について記述する(図 5 参照)。ここで HC_IN_150 はケーブルの切込部温度、HC_OUT_150 はケーブルの近傍空気温、HC_0、HC_100 および HC_150 はケーブルの表面温度である。HC_IN_150 に着目すると、試験体への通電開始後、250 秒の辺りから徐々に温度が上昇し、300 秒までに 200℃へ到達している。また 300 秒ごろにケーブルシースの破裂が発生し、その温度はわずかに低下するものの再び温度が上昇し、434 秒で発火を確認した時、その温度は 705℃まで到達している(図 6 参照)。また、HC_150 についてもシースの破裂に伴い、その温度が急激に上昇していることが見て取れる。次に HC_OUT_150 に着目すると、シースの破裂から約 60 秒後に温度の上昇が見られ、発火を確認した 434 秒には、その温度が 200℃程度まで到達している。また HC_0 と HC_100 については、ケーブルの表面温度を測定しているが、低圧電力ケーブルの場合、ガスの放出は切込位置に関係なく、至るところから放出されており(図 4 および図 5 参照)、シースの破裂や燃焼に伴うケーブルシースの溶融等による影響を受けて、温度の上昇傾向に違いが出ていると考えられる。

３．３　過電流時におけるケーブルの発火機構

過電流時におけるケーブルの発火機構について、実証試験の結果から以下のステップで考察する。

① 過電流によるジュール熱で導体が発熱し、導体周りのケーブル構成材料が加熱される。
② 加熱によってケーブルの内部構成材料が温度上昇すると、内部構成材料の熱分解および含有水分の蒸発が生じる。
③ ケーブルのシースの下に熱分解ガス等が充満し、それに伴うシース内部圧力の上昇およびシースの温度上昇による機械的性質の変化により、シース部分が膨張する。
④ シースの膨張は機械的な強度の限界まで継続し、その後シースが破裂すると、破裂箇所から熱分解ガス等の可燃物を含んだ高温ガスが噴出する。
⑤ 発生ガスの噴出が継続するに伴い、可燃性ガスの濃度および温度が上昇し、ケーブルの発火機構については、以下の条件へ従うものと考えられる。

【ケーブルが発火する条件】

- 発生した可燃性ガスの濃度、および温度が燃焼限界へ到達する場合。
- 発生した可燃性ガスの濃度、および温度は燃焼限界へ到達しないが、絶縁体またはシースの温度が、材料固有の引火温度へ到達し、かつ、ケーブル構成材料の溶融等により高温の導体がむき出しとなる場合。
- 発生した可燃性ガスの濃度、および温度は燃焼限界へ到達しないが、絶縁体またはシースの温度が、材料固有の発火温度に到達する場合。

【ケーブルが発火しない条件】

- 発生した可燃性ガスの濃度、および温度が燃焼限界へ到達しない場合。
- 絶縁体またはシースの温度が、材料固有の引火温度へ到達しない場合。
- 絶縁体またはシースの温度が、材料固有の引火温度に到達するが、ケーブル構成材料の溶融等により高温の導体がむき出しとならない場合。
- 絶縁体またはシースの温度が、材料固有の発火温度に到達しない場合。

４．ケーブルの内部温度上昇履歴の簡易予測モデル

ここで提案する簡易予測モデルは、円形断面を有する単心ケーブルの中心から半径方向への伝熱現象について、一次元熱伝導方程式を解くことを考える(図7参照)。なお、本提案モデルの前提条件については、以下の通りである。

【提案する簡易予測モデルの前提条件】

- 熱伝導による伝熱現象については、ケーブル円形断面の半径方向のみを考慮する。
- ケーブルの構成要素については、導体、絶縁体、シースおよび見かけの空気層(ケーブル内部の空隙)を考慮し、各構成材料の熱物性値については、一様であるものとする。
- 導体の内部については、温度勾配をゼロと仮定し、導体の内部温度は、一様であるものとする。
- 絶縁体およびシースの熱物性値については、それらの温度依存を考慮しない。ただし、導体の電気抵抗値の温度依存については考慮する。
- 加熱中にケーブルで発生する熱分解、相変化、着火および燃焼については、それらを全て考慮しない。

また本モデルの基本式は、以下の通りであり、オイラー陽解法(Forward Time Central Space 法)を適用して近似的に解く。なお、境界条件については、通電によりケーブルで発生するジュール熱、及びケーブル表面の対流による失熱を考慮している。

【基本式】

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left\{ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} = \alpha \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right)$$

ここで α は熱拡散率[m²/s]、r はケーブル円形断面の半径[m]、T はケーブルの温度[K]である。

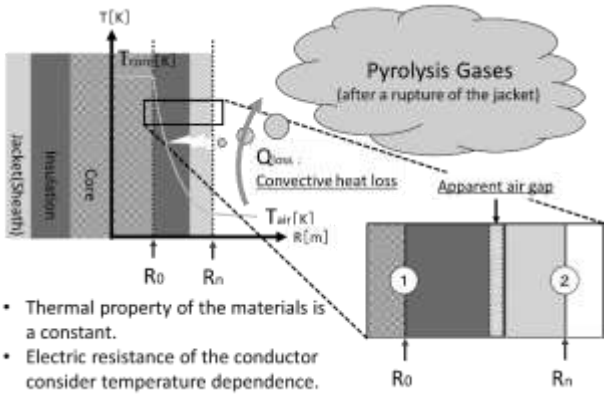


Fig.7 The Concept in One-Dimensional Model

５．実証試験データに基づく簡易予測モデルの検証

試験 H32 および試験 V31 を用いて、提案モデルの検証を実施する。なお、ケーブル温度および雰囲気温度の初期値は、測定データを参考とし、電気導体の断面積は 100 ㎜²、有効長さは 3.5m と設定し、その熱物性値については、文献値[5]から入力している。また絶縁体、シースおよび空気の熱物性値についても同様であり、電流値については実測値を参考にした。その他、時間ステップ幅は 0.003 秒、空間ステップ幅は 1

㎜であり、見かけの空気層厚さについては、入力パラメータの感度解析に基づき、0.3㎜として絶縁体の熱物性値を補正した。なお、このような工夫については、空気層の影響を考慮しない場合、ジュール熱による導体の温度上昇の推定値がケーブル表面温度等の実測値と比較しても、明らかな差異が生じてしまうためである。またケーブル表面の対流熱伝達率については、0.01[kW/m²・K]として計算している。

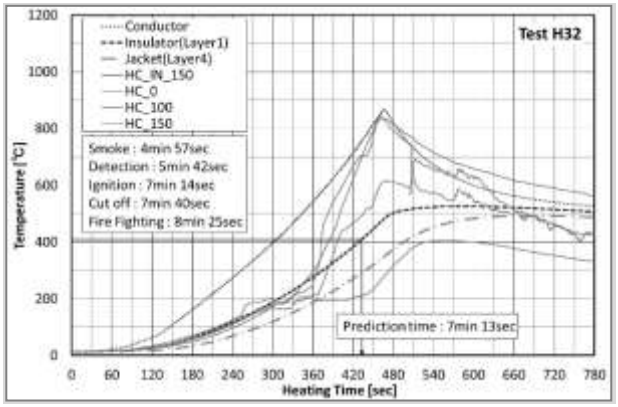


Fig.8 Validation of the prediction model (Test H32)

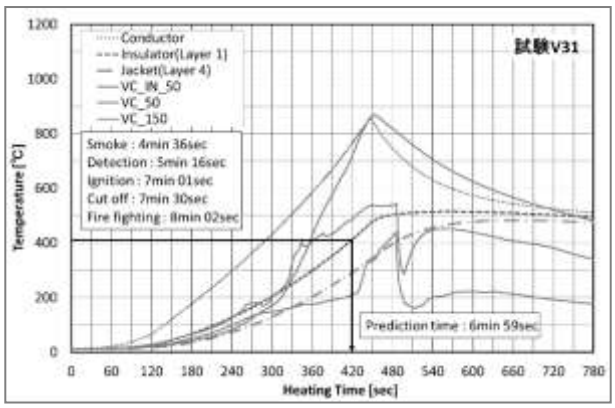


Fig.9 Validation of the prediction model (Test V31)

図8および図9は、提案モデルによる試験H32および試験V31の計算結果を示している。また図内の実線は、各試験における温度の実測値を示しており、それ以外が計算結果である。本提案モデルにおいては、ケーブルで発生する熱分解、相変化、着火、および燃焼について考慮していないため、ケーブルシース温度の計算値が上昇し続けている。発火タイミングについては、構成材料固有の引火点もしくは発火点、または発生ガスの濃度、等が考えられるが、本モデルは固体内の伝熱現象のみを対象としていることから、発生ガスの濃度で発火タイミングを判定することはできない。一方、ケーブル構成材料の固有温度として、引火温度および発火温度が存在しているが、過電流時におけるケーブルの発火機構の考察から、引火の場合は導体が着火源の役割を担うものと推察される。しかしながら、導体そのものが大気中にむき出しとなるタイミングには、ケーブル構成材料の相変化および熱分解などを考慮する必要があり、簡易的な評価は不可能である。したがって、本モデルにおける発火タイミングの判定に関しては、ケーブル構成材料の固有温度のうち、発火温度を採用し、その判定条件としては以下のものを提案する。

【発火タイミングの判定条件】

- ケーブル構成材料のうち、シースの温度が材料固有の融点を超え、かつ、ケーブル構成材料のうち、絶縁体の温度が材料固有の発火点へ到達する場合。

試験 H32 および試験 V31 におけるシースの融点は212℃、絶縁体の発火点は410℃である。したがって、本提案モデルを用いたケーブル内部温度の計算結果へ判定条件を適用すると、ケーブルの発火タイミングは試験 H32 で 433 秒、試験 V31 で 419 秒と判定でき、実証試験と比べて数秒程度早い段階で発火タイミングを予測することが可能となる。

６．まとめ

本研究から得られた成果は以下の通りである。

- 過電流時におけるケーブルの発火機構を整理し、高圧電力ケーブルおよび低圧電力ケーブルにおける燃焼性状の違いを明らかにした。
- 過電流時におけるケーブル火災の簡易評価モデルとして、一次元熱伝導方程式へ基づく計算モデルを構築した。
- 構築した簡易予測モデルについて、実証試験を用いた検証を行い、提案する判定条件を適用した場合では、ケーブルが発火するタイミングを一定の精度で予測できることを確認した。

脚注

註 1. Crosslinked polyethylene insulated polyvinyl chloride seathed cables

謝辞

本研究を実施するにあたり、中部電力(株)ならびに(一財)電力中央研究所から実証試験データ等の情報提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1)原子力規制委員会：実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準,平成 25 年 06 月
2)電力中央研究所：動力ケーブルの過電流による燃焼試験,平成 26 年 09 月,電力中央研究所報告(非公刊)
3)電力中央研究所：難燃性低塩酸耐熱ビニルシース製 600V 電力ケーブルの過電流による燃焼試験,平成 27 年 03 月,電力中央研究所報告(非公刊)
4)電力共同研究：ケーブル火災及び制御盤火災に関する実証研究,PART-1「ケーブル火災に関する実証研究」,昭和 57 年 09 月
5)電線総合技術センター：EM 電線・光ファイバのデータベース整備研究成果報告書,平成 12 年 03 月

目次

〈図表・一覧〉 X
第一章　序論 1
１－１　漠然とした違和感　～安全性という言葉の曖昧さ～ 1
● 原子力技術の平和利用を巡る論争とその問題点 2
● 福島第一原子力発電所炉心損傷事故の概要と原子力規制体系の見直し 4
１－２　研究の背景 8
１－３　研究の目的 8
１－４　本論文の構成 8
参考文献 9
第二章　電線およびケーブルに関する基本事項 11
２－１　電線とケーブルに関する安全規制の大枠 11
● 電気工作物の解説 12
２－２　電線とケーブルの違いについて 15
２－３　電線とケーブルの基本構造 19
● 電圧の種類 19
● CV ケーブルの構造 [13] 20
２－４　電線とケーブルの種類 25
２－４－１　裸線と裸導体 26
２－４－２　絶縁電線 27
２－４－３　低圧電力ケーブル 29
２－４－４　高圧電力ケーブルと特別高圧電力ケーブル 31
２－４－５　制御ケーブル 33
２－４－６　通信ケーブル 34
２－４－７　情報ケーブル 35
２－４－８　同軸ケーブル 36
２－４－９　防災ケーブル 37
２－４－１０　光ファイバケーブル 37
２－４－１１　分岐付きケーブル 38
２－４－１２　キャブタイヤケーブル 39
２－４－１３　コード 41
２－４－１４　エコロジー電線（EM 電線）・ケーブル 42
２－５　電線とケーブルに関する国内外規格 44
２－６　電線とケーブルへ対する性能の評価項目 46

２－７　ケーブルの着火特性と燃焼特性に関する整理 47
２－７－１　電線とケーブルの火災安全に関する評価項目 [28] 47
２－７－１－１　耐延焼性 47
２－７－１－２　発煙性 47
２－７－１－３　発生ガスの毒性と腐食性 47
２－７－１－４　発熱性 48
２－７－１－５　耐火性と耐熱性 48
２－７－２　電線とケーブルの燃焼試験方法 49
２－７－２－１　耐延焼性試験 50
- **一条布設燃焼試験** 50
- **多条布設燃焼試験** 51
２－７－２－２　発煙性試験 57
２－７－２－３　燃焼時発生ガス評価試験 60
２－７－２－４　発熱性試験 66
２－７－２－５　酸素指数試験 66
２－７－２－６　耐火耐熱性能試験 67
- **消防用電線の耐火耐熱性能試験** 67
- **その他の耐火耐熱性能試験** 69
２－８　まとめ 70
参考文献 71
第三章　電線およびケーブルの寄与する火災に関する整理 77
３－１　代表的な火災事例 77
３－１－１　NYC アベニュー電話局のケーブル火災事故 [1] 77
３－１－２　ブラウンズフェリー原子力発電所のケーブル火災事故 [3),4),5),6),7),8)] 80
３－１－３　女川原子力発電所の電気盤火災事故 [9),10),11),12)] 84
３－２　火災統計を用いたケーブル火災に関する検討 87
３－２－１　分類方法 87
３－２－２　ケーブル火災の定義と火災事例の収集手順 89
３－２－３　分類結果 91
３－２－３－１　ケーブル火災の発生件数 91
３－２－３－２　ケーブル火災の焼損床面積と焼損表面積 92
３－３　ケーブル火災の発生（発火）メカニズム 98
- **ケーブル火災（外部要因）の発生メカニズム** 98
- **ケーブル火災（内部要因）の発生メカニズム** 99
３－４　まとめ 101
参考文献 102

第四章　過電流を模擬したケーブルの燃焼試験 104
４－１　ケーブルの過電流火災実証試験の背景 104
４－２　動力ケーブルの過電流による燃焼試験 105
４－２－１　実証試験の試験条件と測定項目 107
４－２－２　過電流による動力ケーブルの発火試験 111
４－２－２－１　試験 H01（難燃性高圧電力ケーブル，切込 1 カ所，水平） 114
４－２－２－２　試験 H02（難燃性高圧電力ケーブル，切込 3 カ所，水平） 118
４－２－２－３　試験 V01（難燃性高圧電力ケーブル，切込 1 カ所，垂直） 122
４－２－２－４　試験 V02（難燃性高圧電力ケーブル，切込 3 カ所，垂直） 125
４－２－２－５　試験 H21（非難燃性高圧電力ケーブル，切込 1 カ所，水平） 128
４－２－２－６　試験 H22（非難燃性高圧電力ケーブル，切込 3 カ所，水平） 131
４－２－２－７　試験 H31（難燃性低圧電力ケーブル，切込 1 カ所，水平） 134
４－２－２－８　試験 H32（難燃性低圧電力ケーブル，切込 3 カ所，水平） 137
４－２－２－９　試験 V31（難燃性低圧電力ケーブル，切込 1 カ所，垂直） 141
４－２－２－１０　試験 V32（難燃性低圧電力ケーブル，切込 3 カ所，垂直） 144
４－２－３　過電流による動力ケーブルの消火試験 147
４－３　まとめ 148
- **過電流火災の発生メカニズム（推定）** 148

参考文献 149
第五章　過電流を模擬したケーブル燃焼試験の熱伝導解析 150
５－１　ケーブル内部温度の上昇に関する簡易予測モデルの提案 150
５－１－１　簡易予測モデルの前提条件 [1),2),3)] 150
５－１－２　簡易予測モデルの基本式 [3)] 151
５－１－３　簡易予測モデルの数値解法 151
５－１－４　簡易予測モデルの初期条件 151
５－１－５　簡易予測モデルの境界条件 151
５－２　実証試験の測定データを用いた簡易予測モデルの検証 153
５－２－１　熱物性値の補正手順 154
５－２－２　空気層の入力値に関する検討 156
５－２－３　ケーブルの発火試験を用いたモデル検証 158
５－２－３－１　試験 H31 を用いたモデル検証 159
５－２－３－２　試験 H32 を用いたモデル検証 160
５－２－３－３　試験 V31 を用いたモデル検証 161
５－２－３－４　試験 V32 を用いたモデル検証 162
５－３　ケーブルの発火に関する判定基準とその妥当性 163
５－４　考察とまとめ 163

参考文献 165
第六章　結論 166
６－１　まとめ 166
６－２　今後の課題 168
謝辞 169
Appendix - 1 -
付録 A　難燃ケーブルについて - 1 -
付録 B　オイラー陽解法（FTCS 法：Forward Time Central Space 法）の解説 - 2 -
付録 C　簡易予測モデルの境界条件の考え方 - 3 -
付録 D　円筒座標系熱伝導方程式の導出 - 5 -
付録 E　最近の話題（中央制御室床下の不適切なケーブル敷設状況について） - 10 -

〈図表・一覧〉

図 1　世界の原子力発電容量の増加見通し[12] 6
図 2　東京電力福島第一原子力発電所内の海抜地図[10] 6
図 3　東京電力福島第一原子力発電所における水素爆発発生後の現場状況[13] 7
図 4　再稼働可能な原子力発電所の新規制基準等対応状況[14] 7
図 5　電線とケーブルの安全規制体系（電気工作物の安全性確保体系）[9] 12
図 6　電気工作物の区分[11] 14
図 7　電線とケーブルの違い（左：電線，右：ケーブル） 18
図 8　代表的な高圧 CV ケーブルの構造例[14] 20
図 9　高圧 CV 単心ケーブル[15] 20
図 10　導体の構造[13] 21
図 11　水トリー現象[15),16),17] 22
図 12　様々な電線ケーブルの集合写真[19] 25
図 13　鋼心アルミより線（左）および光ファイバ複合架空地線[19] 26
図 14　ビニル絶縁電線（IV）[20] 27
図 15　ビニル絶縁ビニルシースケーブル（平型，VVF）[19] 29
図 16　架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル[19] 29
図 17　架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル（CV）[20] 31
図 18　架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル（トリプレックス形，CVT）[20] 31
図 19　制御用ビニル絶縁ビニルシースケーブル[20] 33
図 20　通信ケーブル[19),20] 34
図 21　カテゴリー5 ケーブル[20] 35
図 22　CATV 同軸ケーブル[19] 36
図 23　光ファイバケーブル[19] 37
図 24　屋内配線用ユニットケーブル[19] 38
図 25　キャブタイヤケーブルの構造[7] 39
図 26　ビニルキャブタイヤケーブル[19] 41
図 27　ケーブルの分類に関するフロー 43
図 28　JIS A 1304 における加熱温度曲線[29] 48
図 29　一条布設燃焼試験装置の概要（左：JIS C 3005 試験状況）[30),31] 51
図 30　垂直トレイ燃焼試験装置の概要（左：IEEE383 等，右：UL、IEEE1202）[30] ... 52
図 31　IEC60332-3 試験装置の概要[32] 53
図 32　EN50399 試験装置の概要[32] 54
図 33　ライザーケーブル試験装置の概要[33] 55
図 34　スタイナートンネル試験装置の概要[33] 56

図 35　スモークチャンバー試験装置の概要 [33] 58
図 36　3m キューブ試験装置の概要 [34] 59
図 37　塩化水素発生量／酸性度試験装置の概要 [34] 60
図 38　NES713 試験装置の概要 [34] 62
図 39　EN50305 9.2 試験装置の概要 [34] 63
図 40　BS6853 Annex B.1 試験装置の概要 [34] 65
図 41　BS6853 Annex B.2 試験装置の概要 [34] 65
図 42　コーンカロリーメータ試験装置の概要 [34] 66
図 43　酸素指数評価試験装置の概要 [34] 66
図 44　耐火および耐熱電線の加熱標準曲線 [35] 67
図 45　耐火炉の概要（左：小型，右：大型）[35] 68
図 46　試料の取り付け状況（左：露出試験，右：電線管試験）[35] 69
図 47　IEC60331 シリーズの試験装置の概要 [35] 69
図 48　New York Telephone Exchange Fire[2] 77
図 49　主要配線盤付近のイメージ（左）[21]，ニューヨーク市電話局のスケール（右）
..... 78
図 50　The Browns Ferry Nuclear Plant Fire[3] 80
図 51　ブラウンズフェリー原子力発電所原子炉 1 号機火災事故の焼損範囲 [3),4)] 81
図 52　原子炉建屋の概要 [6] 81
図 53　Browns Ferry 発電所の透視図 [4] 82
図 54　女川原子力発電所で発生した火災による電気盤の損傷状況（右：正常時）[9] 84
図 55　火災発生の推定メカニズム [10] 84
図 56　内部要因と外部要因のデータ分類 89
図 57　ケーブル火災原因の分類（外部要因と内部要因） 90
図 58　国内におけるケーブル火災の発生件数（1995 年～2014 年） 91
図 59　焼損床面積と焼損表面積の例示 [15] 93
図 60　焼損面積の算定方法（補足）[20] 93
図 61　焼損床面積の比較（内部要因と外部要因） 95
図 62　焼損表面積の比較（内部要因と外部要因） 95
図 63　火災 1 件あたりの焼損面積の比較（内部要因と外部要因） 96
図 64　過去 20 年間の発電所における火災発生件数（N=332） 97
図 65　ケーブル火災の分類（外部要因と内部要因） 98
図 66　ケーブルの熱暴露火災に関する発火機構の整理 100
図 67　ケーブルの過電流火災に関する発火機構の整理 100
図 68　試験体の構造（6900V 難燃性高圧電力ケーブル）[1] 105
図 69　試験体の構造（600V 難燃性高圧電力ケーブル）[2] 105

図 70　遮炎シート付ラダー型ケーブルトレイの外観 105
図 71　切込口の導入状況（高圧：24.7 mm、低圧：15 mm）[1),2)] 106
図 72　試験体の敷設状況（水平トレイ試験） 106
図 73　試験体の敷設状況（垂直トレイ試験） 106
図 74　過電流試験に使用した回路図（左：水平トレイ，右：垂直トレイ）[1),2)] 107
図 75　ケーブル近傍温度とケーブル切込温度の違い 110
図 76　切込口の導入深さについて 110
図 77　試験 H01 における温度測定点（数値単位：mm）[1)] 114
図 78　試験 H01 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[1)] 114
図 79　試験 H01 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm） 116
図 80　試験 H02 における温度測定点（数値単位：mm）[1)] 118
図 81　試験 H02 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[1)] 118
図 82　試験 H02 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm） 120
図 83　試験 V01 における温度測定点（数値単位：mm）[2)] 122
図 84　試験 V01 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[1)] 122
図 85　試験 V01 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm） 124
図 86　試験 V02 における温度測定点（数値単位：mm）[1)] 125
図 87　試験 V02 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[1)] 125
図 88　試験 V02 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm） 127
図 89　試験 H21 における温度測定点（数値単位：mm）[1)] 128
図 90　試験 H21 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[1)] 128
図 91　試験 H21 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm） 130
図 92　試験 H22 における温度測定点（数値単位：mm）[1)] 131
図 93　試験 H22 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[1)] 131
図 94　試験 H22 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm） 133
図 95　試験 H31 における温度測定点（数値単位：mm）[2)] 134
図 96　試験 H31 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[2)] 134
図 97　試験 H31 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm） 136
図 98　試験 H32 における温度測定点（数値単位：mm）[2)] 137
図 99　試験 H32 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[2)] 137

図 100　試験 H32 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm） 139
図 101　試験 V31 における温度測定点（数値単位：mm）[2] 141
図 102　試験 V31 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[2] 141
図 103　試験 V31 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm） 143
図 104　試験 V32 における温度測定点（数値単位：mm）[2] 144
図 105　試験 V32 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[2] 144
図 106　試験 V32 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm） 146
図 107　銅の抵抗率の温度変化 152
図 108　ケーブルにおける一次元モデリング要素体系 152
図 109　空気層厚さ 0.0 mmの場合 156
図 110　空気層厚さ 0.1 mmの場合 156
図 111　空気層厚さ 0.2 mmの場合 156
図 112　空気層厚さ 0.3 mmの場合 156
図 113　空気層厚さ 0.35 mmの場合 156
図 114　空気層厚さ 0.4 mmの場合 156
図 115　提案モデルにおける発火タイミングの判定条件 158
図 116　試験 H31 の温度実測値とモデルによる計算値の比較 159
図 117　試験 H32 の温度実測値とモデルによる計算値の比較 160
図 118　試験 V31 の温度実測値とモデルによる計算値の比較 161
図 119　試験 V32 の温度実測値とモデルによる計算値の比較 162

表 1　電気工作物に関する技術基準の分類 13
表 2　電気工作物の区分 [11] 14
表 3　電線の定義、解釈または解説の一覧 [4),6),7),8)] 15
表 4　弱電流電線及び光ファイバケーブルの定義、解釈または解説の一覧 [4),6),7),8)] . 16
表 5　日米における電圧の種類とその限界値 [4),6),12)] 19
表 6　電線およびケーブルの種類 [14] 25
表 7　裸電線の種類と材料 [7] 26
表 8　絶縁電線の種類と材料 [7] 27
表 9　主な絶縁電線の製品一覧 [14] 27
表 10　低圧ケーブルの種類と材料 [7] 29
表 11　主な低圧電力ケーブルの製品一覧 [14] 29
表 12　高圧ケーブルの種類と材料 [7] 31
表 13　主な高圧・特別高圧電力ケーブルの一覧 [14] 32
表 14　主な制御ケーブルの一覧 [14] 33
表 15　主な通信ケーブルの一覧 [14] 34

表 16　主な情報ケーブルの一覧 [14] 35
表 17　主な同軸ケーブルの一覧 [14] 36
表 18　主な防災ケーブルの一覧 [14] 37
表 19　主な分岐付きケーブルの一覧 [14] 38
表 20　キャブタイヤケーブルの種類と材料（絶縁体）[7] 39
表 21　キャブタイヤケーブルの種類と材料（外装「シース」）[7] 40
表 22　主なキャブタイヤケーブルの製品一覧 [14] 40
表 23　主なコードの一覧 [14] 41
表 24　主なエコロジー電線・ケーブルの一覧 [14] 42
表 25　電線とケーブルに関する国内規格 [21),22),23),24),25),26] 44
表 26　電線とケーブルに関する国外規格 [21),22),23),24),25),26] 44
表 27　JIS C 3005 における電線とケーブルの性能評価項目 [27] 46
表 28　電線とケーブルの燃焼試験 49
表 29　一条布設燃焼試験の代表例 [30] 50
表 30　北米系規格における垂直トレイ試験の代表例 [30] 52
表 31　IEC60332-3 の試験条件 [32] 53
表 32　欧州系規格における燃焼試験 IEC60332-3 と EN50399 の比較 [32] 54
表 33　代表的な発煙性評価試験 [33] 57
表 34　代表的な燃焼時発生ガス毒性評価試験 [34] 61
表 35　検知対象ガス成分の C_f 臨界濃度（単位：ppm）[34] 61
表 36　事前試験（定性分析）結果と本試験の関係 [34] 62
表 37　ガス成分の CCz 値（臨界濃度：mg/m^3）[34] 63
表 38　検知対象ガスの臨界濃度（基準値 f_x※）[34] 65
表 39　主な耐火耐熱性能試験 [35] 67
表 40　低圧耐火電線の加熱前後の電気特性 [35] 68
表 41　低圧耐火電線の露出試験における屈曲条件 [35] 68
表 42　IEC60331 シリーズの試験条件 [35] 69
表 43　日本標準産業分類の変遷 [16),17),18),19] 88
表 44　分析対象の選別に用いた火災報告上の分類項目と分類番号 [15] 88
表 45　国内におけるケーブル火災の発生件数（1995 年～2014 年） 91
表 46　焼損面積の算定方法（具体例）[15] 93
表 47　ケーブル火災の焼損床面積と焼損表面積 94
表 48　高圧電力ケーブルの試験条件一覧 [1] 107
表 49　低圧電力ケーブルの試験条件一覧 [2] 108
表 50　高圧電力ケーブル（難燃性）における測定項目 [1] 109
表 51　低圧電力ケーブル（難燃性）における測定項目 [2] 109

表 52　高圧電力ケーブル（難燃性）過電流発火試験結果 1) 111
表 53　高圧電力ケーブル（非難燃性）過電流発火試験結果 1) 112
表 54　低圧電力ケーブル（難燃性）過電流発火試験結果 2) 112
表 55　試験 H01 の燃焼性状（試験開始 6 分 16 秒～8 分 26 秒）1) 115
表 56　試験 H02 の燃焼性状（試験開始 5 分 45 秒～7 分 41 秒）1) 119
表 57　試験 H02 の発火状況（発火位置：ケーブル測定位置 50）1) 119
表 58　試験 V01 の燃焼性状（試験開始 5 分 29 秒～7 分 45 秒）1) 123
表 59　試験 V02 の燃焼性状（試験開始 5 分 40 秒～7 分 45 秒）1) 126
表 60　試験 H21 の燃焼性状（試験開始 5 分 30 秒～6 分 45 秒）1) 129
表 61　試験 H22 の燃焼性状（試験開始 5 分 30 秒～6 分 25 秒）1) 132
表 62　試験 H31 の燃焼性状（試験開始 3 分 23 秒～8 分 03 秒）2) 135
表 63　試験 H32 の燃焼性状（試験開始 4 分 57 秒～8 分 10 秒）2) 138
表 64　試験 V31 の燃焼性状（試験時間 4 分 36 秒～7 分 45 秒）2) 142
表 65　試験 V32 の燃焼性状（試験時間分秒～分秒）2) 145
表 66　高圧電力ケーブル（難燃性）過電流消火試験結果 1) 147
表 67　低圧電力ケーブル（難燃性）過電流消火試験結果 2) 147
表 68　提案モデルの入力パラメータ 5) 153
表 69　空気層をパラメータとして補正した絶縁体の熱物性値（高圧ケーブル） ... 154
表 70　空気層をパラメータとして補正した絶縁体の熱物性値（低圧ケーブル） ... 155
表 71　提案モデルの検証に用いた絶縁体の入力パラメータ 157
表 72　難燃性低圧電力ケーブルの固有温度 6) 158
表 73　難燃ケーブルの性能実証試験 ..... - 1 -
表 74　PCPS の構成 ..... - 11 -
表 75　HICAT の構成 ..... - 11 -
表 76　各配線方式の比較 ..... - 12 -
表 77　PCPS の分離性能実証試験 ..... - 13 -

第一章　序論

１－１　漠然とした違和感　～安全性という言葉の曖昧さ～

筆者は東京で生活を始めて 6 年目となるが、夜間における街全体としての明るさに対しては、未だに違和感というか、疑問というものが残っている。当然ながら「さらに豊かに、もっと便利に！」というようなベクトルをもった試みは、個人的にも大変素晴らしいとは思うものの、ちょっと意識して見直してみると、少々行き過ぎた部分もあるような気がする。もちろん、「都市部へ人口が集中し、資源を大量に消費する」ような、局所集中型の消費体系が構築されたのは、今に始まったことではない。しかし、だからこそ我々現代人が日常生活の中で、特に都市部で生活している人々ほど、自身が 1 日でどのくらいの電力を消費するか、などと考えるだろうか。恐らく、大半は考えていないと思われる。つまり、ほとんどの現代人に共通して当てはまることは、個人のエネルギー消費へ対する意識が鈍化している、という事実である。

そのような社会情勢の中で 2011 年の東日本大震災（以下、大震災）を契機として、それまで電力供給システムの要とされてきた「原子力発電」に関して、我々は国家のエネルギー戦略レベルで再考する機会を得たのである [1)]。また 2016 年の 04 月からは、電力の小売全面自由化、そして 2017 年の 04 月にはガスの小売全面自由化を順次実施していく計画となっており [2)]、一般大衆のような個人レベルでも、エネルギー消費へ対する意識の変革が求められている。

大震災後の我が国では、国内全ての原子力発電所に運転停止命令が下され、その不足分は石炭・石油火力等の老朽発電設備で代替することになった。それに伴い、発電用の化石燃料の消費量が増加し、燃料費そのものが高騰した影響もあって、国内の電気使用料金（いわゆる電気代）が大幅に値上がりした。このことは一般家庭と産業界全体の不満へとつながり、電気使用料金だけでも「原子力発電」への賛成、反対の立場を二分する一つの指標となりつつある。

また大震災以降、停止された原子力発電所を再び稼働するためには、2013 年に原子力規制委員会（以下、NRA）が策定した新規制基準 [3)]へ適合することが課されている。このうち火災防護に関する基準については、従来の仕様規定的な内容を強化し、それらの要求項目を全て遡及適用することになっているが、原子力施設の火災防護で先進的な米国と比較してみても、合理性に欠けている部分があることは否定できない（筆者自身の規制当局における採用試験等の体験に基づき、記しておくと、規制当局は性能的なアプローチを否定したつもりはない、との見解である。しかしながら、性能論で新規制基準への適合性審査を実施するには、長い年月やそのためのインフラ整備が必要となることから、実用的には決定論を選択せざるを得ない状況である）。

この新規制基準の策定に関する検討については、主として当時の NRA 委員と原子力規制庁（以下、同様に NRA）職員によって実施されたものである。そのうち、火災に関する詳細な検討内容については、2012 年から 2013 年にかけて実施されている（発電用軽水型原

子炉の新規制基準に関する検討チームの会合（第 04 回，第 11 回，第 16～20 回）を別途参照していただきたい)。この一連の検討過程の中には、日本の原子力発電所の火災へ対する安全性を確保するためのロジックが凝縮されており、今後の日本で取り組むべき課題が暗示されていると考えている。さらに、それらの議事録や動画共有サイト（例えば Youtube）で公開されている映像へ目を通してみると、新規制基準の策定の際には、規制当局も混乱の最中で要求内容を検討していたことが理解できる[4),5)]。以上のことより、火災防護に関する規制システムの高度化については、継続的な課題として扱われ得ることが窺える。

- **原子力技術の平和利用を巡る論争とその問題点**

また大震災以降、「原子力技術の平和利用」に対しては、必要か否かの論争が引き起こされている。この点については、原子力を取り巻く安全上の諸問題に限らず、全ての分野で共通していると思われるが、社会の安全性に関わる専門家と一般大衆との間では、あるハザードへ対して各々の有する認識レベルの情報共有が、十分になされていないことが問題であると思われる。つまり、我が国の現状は、対象とする分野の安全性に関する研究と、それに対する一般大衆の理解に著しい遅れが存在している。このような現状こそが論争を一層複雑にする、一つの原因として考えられるだろう。

さらに大震災以前では、「非常事態を収拾できるよう、必要な対策を施しているので、何があっても大丈夫です。」というような形で、原子力発電所の安全性が宣伝されていた。つまり、近年の我が国には「何（製品、技術、場所など）に対しても安全です！」と誰もが（たとえ技術者や専門家の真意は異なっていても）言わなければならない、そのような社会情勢が構築されてきたのではないだろうか（100%の安全でなければ、一般大衆に許容してもらえない)。なお、このことは原子力に限った話ではなく、他分野においても 1 つぐらいは同じ状況があるのではないか、と推測する。この点について、大震災後の原子力分野については、積極的な変化が見られるため、少しだけ改善へ向けて前進し始めているのかもしれない。

まず、前者の問題点について考えると、いわゆるリスクコミュニケーション上の問題に帰結する、と思われる。すなわち、ある対象の顕在的または潜在的な危険に関して、それらに理解ある専門家が一般社会に対して、丁寧な説明に基づく意思疎通、情報共有を図っていくようなシステムの整備が必要、ということである。ここでは具体的な解決策を提示するわけではないため、個人的な感触だけで述べてみると、米国の場合は、一般大衆と規制当局などの専門家との間で、定期的な討論会が開催されている。これは大いに参考とするべき事例ではないだろうか。

また直近の我が国における事例を挙げてみると、内閣府の原子力委員会第 44 回定例会議（平成 27 年 12 月 09 日）において、原子力委員会と柏崎刈羽の地域団体との間で議論が行われている。その中では、「地域住民（国民）は、公開された情報を判断するための基礎知識を身につけることが必要」、「冷静で客観的な議論を重ねるべき」等の継続的な課題や意見

の交換が住民側から積極的になされており[6]、このような取り組みを更に発展させていくことが、改善への糸口となることに期待したい。

次に後者の問題となるが、そのための一般的な工学論を紹介しておこう。なお、以下の参考書籍の内容は、筆者の師である辻本教授の博士論文中でも引用されている。参考書籍の中では、「工学者は、要求される側に位置し、要求の方は、社会構造や経済の中から、又、快適性と安全性の価値均衡の中で決定され、工学者の使命とは、示された要求を社会の規定する枠の中で、最も効率よく実現することである。」[7]との工学論が記述されている。この主張に対して、「工学とはこういうものだ。」と切り返せるほど、自分自身の「工学論」に対する理解は十分ではないが、仮にこの主張へ従うならば、「工学者とは、あくまで要求される側であり、（社会側から）示された要求に対して、工学者自らは（逆に社会へ対して）要求する側に立つことができない」、ということになる。これについては後者の問題と深い関わりがあるような気がする。

例えば社会構造からの要求で、無理難題が押し付けられたと仮定する。その場合は技術者でもある工学者が、本来ならばそれを実現するために、それを（技術者、工学者へ）要求した側（社会構造）へ対して、様々な事情や条件等を問い直す（要求する）必要があると思われる。しかしながら、工学者自らで社会的な圧力やヒステリックな一般大衆の声を先取するあまり、ある種の問題を先送りにして、課された要求については、社会的な枠組みの中での実現を第一とし、その実現後に何か起これば、一部の技術者へ全責任を押し付ける、というような悪循環が生まれ続けていく。これこそがまさに問題の根底ではないだろうか。そのような状態を解消するためには、要求されるだけではない工学者がいること、社会と工学者をつなぐ要求そのものを調整する機関（ここでは規制当局と解釈する）が機能を果たすこと、対象とする問題の議論に社会や一般大衆が冷静であること、の三つが満たされなければならない。これらについては現在の原子力分野では、いずれも十分なレベルにあるとは言い切れないだろう。

筆者は原子力分野の火災防護に関する安全性について、工学者としてのアプローチを志している。そのため、あらゆる要求を工学的に分解し、それぞれについて、現時点ではどこまで実現可能なのか、工学的な判断を行い、その思考および判断プロセスを明確に示すことで、社会構造や一般大衆のための判断材料を提示し、社会全体としての意思決定に貢献することが使命である、と考えている。またその提示した内容が、社会や一般大衆から許容されるかどうかについては、あくまで工学的なアプローチを超えた別次元の話（トランスサイエンス）であり、ここで重要なことは、現状で到達できるレベルを明確に示すことである、と強調して述べておきたい。そうでなければ原子力の分野では、対象施設への「安全性」という要求に対して、今後も混乱に混乱を呼ぶ状態が続き、様々な矛盾が交錯することで取り返しのつかない事態となる可能性がある。したがって、工学を志す者としては、少なくともこ

の分野の火災防護技術についても、一般大衆に対して、十分な判断材料を示し得る段階まで、安全研究を進展させるべきだと考えている。

言いたい放題ついでに、もう一つだけ述べておくと、昨今の原子力を取り巻く状況はあまり芳しくないと感じている。何が良くないかというと、本来ならば国の総力を挙げて産・学・官の共同で取り組むべき問題を、産・学または官・学といった協力体系のみで事を進めている点である。当然ながらこの点については、大震災以前の「規制の虜（専門性の欠如が原因で産と官が癒着した状態）」や、「原子力ムラ（原子力の利権で結ばれた産学官の閉鎖的かつ社会的集団）」等の前例が尾を引いている、ということを重々承知している。しかし、若輩者としては、この現状が打破され、産学官が再び同じ土俵へ立ち、一般公開の場で議論を始めてこそ、はじめて日本国としての真価が発揮されると思うのである。原子力の技術を取り巻く諸問題は、平和利用のみに限定しても日本固有のものではなく、世界共通そして人類共通の課題である（図 1 参照）。故に個人としては、早期の変革を心底望む次第である。

- **福島第一原子力発電所炉心損傷事故の概要と原子力規制体系の見直し**

ここで当時の状況を簡単に振り返る。2011 年 03 月 11 日、大地震[8]が発生した福島第一原子力発電所（以下、1-F）では、1～3 号機が通常運転中であり、4～6 号機が定期検査のために停止中であった。また地震による震度 6 強の揺れを感知すると、1～3 号機は次々と正常な緊急停止を達成した。なお、被災当初では原子炉の緊急停止に伴い、非常用炉心冷却設備（Emergency Core Cooling System 以下、ECCS）が作動していたが、地震の発生から数十分後、想定外の津波（高さ 15.5m）が 1-F へ襲来し（図 2 参照）、所内電源の大部分を喪失してしまった（所内電源の喪失を想定し、所内の屋外スペースへ設置していた非常用発電設備の燃料タンクも流された）。したがって ECCS への電力供給が断たれ、原子炉内にある核燃料の継続的な冷却を満足に行うことができなかった。ここで参考までに、ECCS の継続運転がなぜ必要か、原子力発電の仕組みを交えて概説する。

・原子炉の緊急停止に関する概説[15),16)]

平常時の原子力発電所では、継続的な核分裂による発熱を利用して水蒸気を発生させ、発電用のタービンを駆動し、発電を行っている。この平常運転中にプラントで異常があり、緊急にプラントを止める必要が生じると、その異常を検知して炉心へ制御棒を挿入し、核分裂による発熱を停止させる仕組みがある。これによって、核分裂による大きな発熱はなくなるが、原子炉内では核燃料の崩壊熱（原子炉の炉心では発電のための核反応を停止しても、その 1 秒後で運転出力の約 7%の熱が新たに生じ、時間の 0.2 乗に比例して減少しながら 1 日後でも約 0.6%の熱が放出される[9)]）による発熱が継続されている。したがって、この崩壊熱を除去しなければ、核燃料の健全性（過剰な温度上昇により溶融する；メルトダウン）を維持できなくなるため、崩壊熱の除去を行うために原子炉停止後も炉心冷却を継続する必

要がある。

国内の原子力発電所の原子炉は軽水炉であり、冷却材としては水を使用している。そのため、原子炉の停止後も原子炉冷却系を用いて注水することで、核燃料が水に浸かった状態を維持し、炉心冷却の継続がなされる。なお、原子炉の緊急停止では「止める、冷やす、閉じ込める」の３ステップで、それぞれ必要な措置が取られることになるが、このうち「冷やす」については、さらに「高温停止」と「低温停止」といった 2 つの状態が存在する。

この「高温停止」とは、炉心で制御棒を全挿入し、核燃料を未臨界状態とした際の停止状況であり、原子炉内では高い圧力が維持されている。その一方で「低温停止」とは、原子炉内の冷却水温度が 100℃未満となり、原子炉圧力が大気圧になった状態のことを指すもので、これは「高温停止」の段階から水蒸気の循環（復水器）によって、原子炉内を所定の圧力まで低下させ、その後、さらに注水して（ある程度減圧しなければ、外部から注水できない）、崩壊熱の除去を継続し、原子炉を減圧することで達成されるものである。したがって、このために ECCS の継続運転を確保しなければならない。また参考までに大震災時の女川原子力発電所においては、原子炉の停止後、「高温停止」から「低温停止」を達成するまでには、およそ 10 時間を要したことが報告されている [17]。

つまり、1-F の場合は「高温停止」達成後の第 2 段階で制御不能（ECCS の継続運転不可）となり、その結果として、1～3 号機の原子炉全てが炉心損傷、1 号機、3 号機、4 号機の原子炉建屋が水素爆発により崩壊（当時の 4 号機は停止中であり、原子炉内に核燃料は存在しなかったが、3 号機で発生した水素がベント用の配管を通じて流入し、爆発したと推測されている）、高濃度かつ大量の放射性物質を大気中へ放出する [10]、といった人類史上に例を見ない程の大惨事が引き起こされたのである（図 3 参照）。なお、この一連の事故については、国際原子力・放射線事象評価尺度（INES）において、最も深刻なレベル 7 として位置づけられており [11]、この事故に関わる収拾作業や、1-F の廃止措置（完遂時期は不明）は現在も継続中である。

当然のことながら、1-F の事故に関する調査と原因分析も行われており、それらの成果は報告書や映像、市販雑誌など、様々な媒体としてまとめられている。例えば国会事故調の中では、事故を契機に得られた教訓から 7 つの提言がなされており [5]、それらへ対応する形で 2012 年の 9 月、原子力規制委員会（NRA）とその事務局である原子力規制庁（NRA）が発足し、従来の原子力規制体系が大幅に見直されることとなった。また、社会政治的な情勢の変化もあり、原子力発電技術の在り方については、二転三転する可能性もあるが、NRA の発足から約 3 年の月日を経て、新規制基準への適合性審査に合格し、原子力発電所の再稼働へ至った原子力事業者も現れ始めている。現状では 2015 年内までに、国内 50 基の原子炉のうち 5 基が廃炉決定となった。また 26 基については、新規制基準への適合性審査が申請されており、それ以外の原子炉については未定となっている。なお、2015 年内までには、3 サイト 5 基の原子炉が運転許可を得ており、そのうちの 2 基が既に稼働中である（図 4 参照）。残りの 21 基については、今後数年程度で審査対応される予定である。

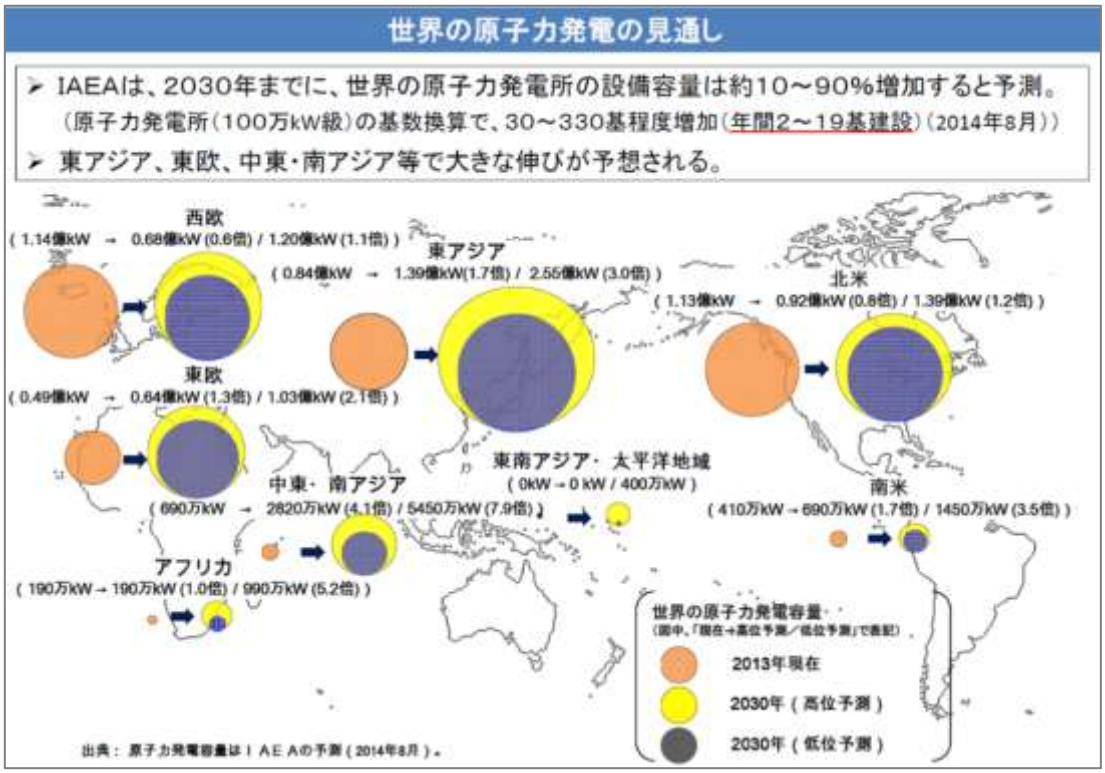


図 1　世界の原子力発電容量の増加見通し [12)]

図 2　東京電力福島第一原子力発電所内の海抜地図 [10)]

図 3　東京電力福島第一原子力発電所における水素爆発発生後の現場状況 [13)]

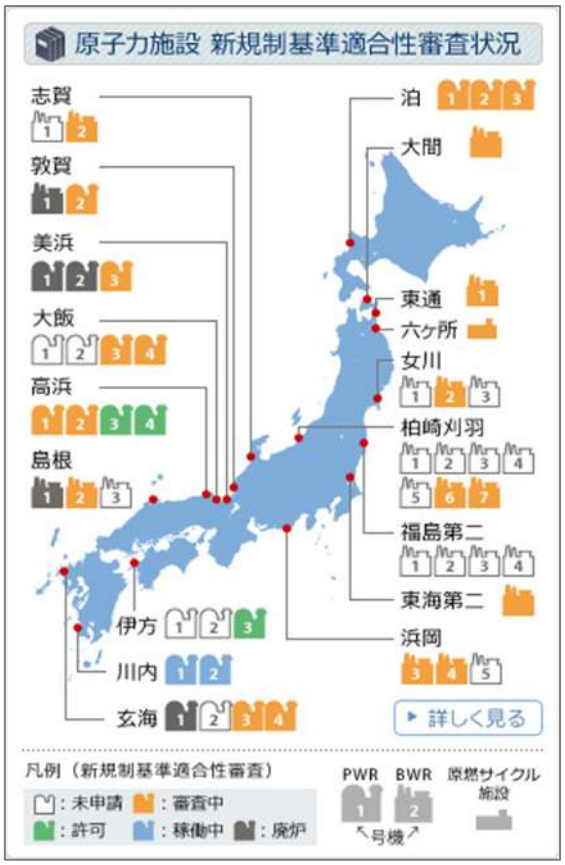


図 4　再稼働可能な原子力発電所の新規制基準等対応状況 [14)]

１－２　研究の背景

近年、原子力発電所の火災防護に係る新規制基準への適合性審査に向けて、原子力事業者が提案する実施対策（既存・新規を含む）の有効性評価を目的とした、火災の実証試験が多数行われている。その中でも、ケーブルを可燃物とした火災について言えば、原子力事業者の方針により様々な取り組みがなされている（例えば、延焼防止剤を塗装した非難燃性ケーブルの性能評価試験など）。そもそもケーブル火災については、熱暴露等に起因してケーブルの外部から発生する火災と、過電流等に起因してケーブルの内部から発生する火災、の 2 つに大別することができる。そのうち前者については、試験方法や研究成果が複数存在しているが、後者については、科学的な知見が限られており、また技術的な検討も十分になされていないという実態がある。

１－３　研究の目的

そこで本研究では、電線およびケーブルが寄与する火災のうち、ケーブルの内部から発生する火災シナリオを対象とする。その中でもケーブルの過電流火災へ着目し、過去に実施された火災実証試験について、電気事業者とその研究機関から情報提供を受け、それらを詳細に分析することで、ケーブルにおける過電流火災の発生メカニズム、および火災時におけるケーブルの燃焼性状について、把握することを目的とする。加えて、ケーブル内部の温度上昇を予測する簡易的な計算モデルを構築し、実証試験を用いたモデルの検証を行うことで、ケーブルの過電流火災に対して、有効な評価手法またはその方法論を提案することを最終目標とする。

１－４　本論文の構成

本論文は、以下の構成から成り立つ。第二章では、ケーブルの種類および構造、関連規格、一般的な性能の評価項目など、電線およびケーブルに関する基本事項を整理している。第三章では、電線およびケーブルで発生する火災に関して、それらの火災統計、発生メカニズム、代表的な火災事例などを整理している。第四章では、電力ケーブルに関する過電流火災の実証試験について、試験映像と測定データに基づく試験結果の整理を行い、試験時の発火メカニズムに関して考察する。第五章では、ケーブルの過電流火災に関する評価手法として、簡易予測モデルを提案し、実証試験の測定データを用いて、それらの予測結果と試験結果の比較から、提案モデルの検証を実施する。第六章では、全体的な論文の総括を行い、今後の課題として挙げられるものを整理している。

※　１－１「漠然とした違和感」では、その大部分で持論を展開するような書き方をとった。甚だ未熟な内容であるものの、この中には筆者がこれまでに感じてきたことを（自身の勉強不足を痛感しながら）、何とか必死に文章化したつもりである。したがって、その内容については許しを乞うと共に、読者諸賢の叱正を仰ぎたいと考える次第である。

※ 電線およびケーブルに関する知識が豊富な場合は、第二章が筆者の勉強不足もあって、概説となってしまった。したがって、内容については第三章から目を通せばよい。第四章の内容は、非公刊で報告書も存在しているが、試験結果をより視覚的に理解できるよう配慮し、個人的な考察等も加えながら、試験について再整理したつもりである。また第五章の内容は、複雑な現象を如何に単純なモデルとして整理するか、という観点でアプローチしたつもりである。

参考文献

1）国家戦略室（2012 年 12 月廃止）：革新的エネルギー・環境戦略，平成 24 年 09 月 14 日，エネルギー・環境会議，
http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20120914/20120914_1.pdf

2）経済産業省資源エネルギー省：電力の小売全面自由化の概要，2015 年 11 月，
http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/electricity_liberalization/pdf/summary.pdf

3）原子力規制委員会：新規制基準について，2015 年 10 月 27 日更新，
http://www.nsr.go.jp/data/000070101.pdf

4）原子力規制委員会：第 17 回会合議事録，第 17 回発電用軽水型原子炉の新規制基準に関する検討チーム，p. 21
http://www.nsr.go.jp/data/000050427.pdf

5）原子力規制委員会：第 18 回会合議事録，第 18 回発電用軽水型原子炉の新規制基準に関する検討チーム，p. 08
http://www.nsr.go.jp/data/000050428.pdf

6）内閣府原子力委員会：透明性と信頼～住民の視点から～，第 44 回原子力委員会定例会議資料第 1 号，平成 27 年（2015 年）12 月 09 日，内閣府原子力委員会 HP，
http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2015/siryo44/index.htm

7）西山卯三：建築論，勁草書房，1969 年 04 月

8）気象庁：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震～The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake～，2015 年 06 月 25 日時点，国土交通省気象庁 HP，
http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2011_03_11_tohoku/

9）一般社団法人電気学会：発電・変電 改訂版，オーム社，2000 年 06 月 30 日第 2 版第 1 刷，
https://www.iee.or.jp/cfml/OA/front/NonAuthenticate/bookpur/fbo_BookDetail.cfm?objectID=7DD7B974-F13A-2FCC-E11A5B4E8B524DE6

10）ニュートン別冊：よくわかる,発生から事故処理まで　原発を考えるうえでの必須資料 検証福島原発 1000 日ドキュメント，pp. 34-35，2014 年 05 月 15 日発行

11）東京電力㈱：（コメント）東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所の事故・

トラブルに対するＩＮＥＳ（国際原子力・放射線事象評価尺度）の適用について，平成 23 年（2011 年）04 月 12 日，プレスリリース 2011 年，
http://www.tepco.co.jp/cc/press/11041204-j.html
12）経済産業省資源エネルギー庁：原子力発電における論点，総合資源エネルギー調査会，長期エネルギー需給見通し小委員会（第５回会合），資料４，平成 27 年（2015 年）03 月，
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/005/pdf/005_08.pdf
13）図 3 出典： http://ameblo.jp/tachiagare-nihonjin/entry-10831991782.html
14）一般社団法人原子力安全推進協会：原子力施設　新規制基準適合性審査状況，2015 年 12 月 14 日時点，（一社）原子力安全推進協会 HP，http://www.genanshin.jp/
15）原子力発電所の火災防護専門委員会：米国原子力発電所の火災防護に関する法規制の変遷と整備状況，p.22，2015 年 05 月
16）原子力発電所の火災防護専門委員会：2.1 高温停止について，第四回委員会資料，
http://www.rs.kagu.tus.ac.jp/tujimoto/shiryo_4_2_1.pdf
17）東北電力株式会社：東北地方太平洋沖地震による女川原子力発電所の状況について，平成 23 年（2011）04 月 26 日，
http://www.tohoku-epco.co.jp/ICSFiles/afieldfile/2011/04/26/110426_siryou.pdf

第二章　電線およびケーブルに関する基本事項

電線とケーブルの基本事項については、理解するまでにかなりの時間を要したことを述べておきたい。２－１では基本事項への導入として、日本における安全規制の全体像を整理する。

２－１　電線とケーブルに関する安全規制の大枠

電線とケーブルに関する安全規制の大枠に関しては、総務省行政管理局が運営する電子政府[1)]を用いて、電線とケーブルに関する規制文書等の調査を行った。その結果、当該機器へ対する安全規制の最上位に位置するものとしては、電気事業の合理的な発達等を目的とした「電気事業法」[2)]、電気用品の安全性を確保すること等を目的とした「電気用品安全法」[3)]が存在している。また「電気事業法」については、主として事業と保安に関する規制が定められており、「電気用品安全法」には、製造と販売に関する規制が定められている。さらに「電気工事士法」や「電気工事業の業務の適正化に関する法律（以下、電気工事業法）」などで、工事業に関する規制が定められており、これらを段階別（製造販売、工事、および維持運用の 3 段階）に適用することで、電線とケーブルに関する安全性の確保が図られている（図 5 参照）。

また「電気事業法」および「電気用品安全法」の場合、それぞれの技術基準の詳細については、前者が「電気設備に関する技術基準を定める省令（以下、電技省）」[4)]、後者が「電気用品の技術上の基準を定める省令（以下、電用技省）」[5)]を参照している。さらに経済産業省の「電技省」に関しては、担当部署である電力安全課から「電気設備に関する技術基準を定める省令の解説（以下、電技省解説）」[6)]、「電気設備の技術基準の解釈（以下、電技解釈）」[7)]、「電気設備の技術基準の解釈の解説（以下、電技解説）」[8)]、といった文書も公開されており、「電用技省」についても同様の解釈が整備されている。

ただし、「鉄道営業法、軌道法、および鉄道事業法などの適用を受けるもの」、「原子力を原動力として電気を発生するために施設する電気工作物（以下、原子力発電工作物）」については、「電技省」の適用を除外されており、それぞれ独自の技術基準へ適合するよう、義務付けられている（表 1 参照）。

次にこれらの適用範囲については、「電気工作物」の区分に従い、所々で二重規制を避ける努力がなされており、それぞれの技術基準に関する解釈をまとめた文書の中では、電線とケーブルに関して具体的な解説が記述されている[4),5),6),7),8)]。したがって、以降では「電気工作物」の解説を行い、電線とケーブルに関する安全規制の全体像を把握していくこととする。

● 電気工作物の解説

一般に電線とケーブルは、電気事業法で定義される「電気工作物」に該当する。この電気工作物とは、「発電、変電、送電若しくは配電又は電気の使用のために設置する機械、器具、ダム、水路、貯水池、電線路その他の工作物（船舶、車両又は航空機に設置されるものその他の政令で定めるものを除く。）」[2)]を指し、その区分は表 2、図 6 を参照されたい。

また電線とケーブルについては、その中でも「電線路」の部分へ該当し、同法による「電線路」の定義には、「発電所、変電所、開閉所及びこれらに類する場所並びに電気使用場所相互間の電線（電車線を除く。）並びにこれを支持し、又は保蔵する工作物」[3)]という記述がある。すなわち、「発変電所や開閉所、電気使用場所など電気的な単位をなす場所相互の間を連絡する電線と、これを支持し、保蔵する工作物（がいし、支線等を含む。）」を総称する言葉が「電線路」であるものの、配線用（電気使用場所に施設する電線で、電気機械器具内の電線を含まない）電線は、電線路の定義には含まれていない[6),7),8)]ことに留意されたい。

ここで、電気工作物（例えば電線とケーブル）に関する安全規制については、製造販売、工事、維持運用の 3 段階に分けて解説する（図 5 参照）。

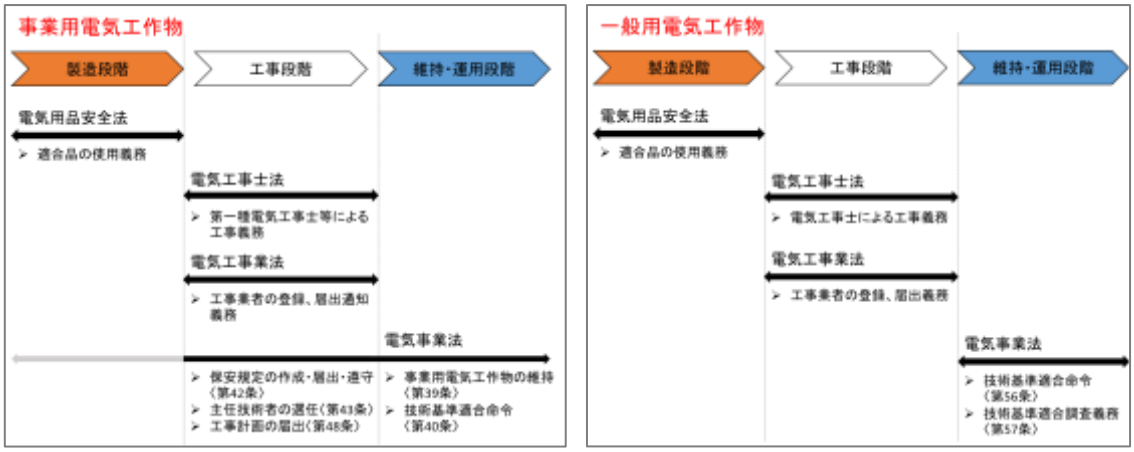


図 5　電線とケーブルの安全規制体系（電気工作物の安全性確保体系）[9)]

まず製造段階について、事業用電気工作物と一般用電気工作物の両者（表 2 の電気工作物）へ対しては、「電気用品安全法」による規制が課せられている。また事業用電気工作物へ対しては、「電気事業法」による規制も存在しているが、これについては間接的なものと理解すればよい。なぜならば、事業用電気工作物を扱うものは、電気工事士などの電気に関する知識が豊富なものであり、その一方で一般用電気工作物を扱うものは、一般大衆へ代表されるように電気に関する知識が豊富でないからである。

したがって、一般用電気工作物へ対しては、製造段階から規制を課すことで、安全性を確保する必要があるが、事業用電気工作物に対しては、製造段階で直接的に規制する必要は生じない。ただし、実用的な観点から考察してみると、電気工作物へ対しては、電技省への適

合命令が課されており、その技術基準の中には、電気用品安全法を適用されないものに関する記述も存在している（表 1 参照）。したがって、事業用電気工作物の製造段階であっても、間接的には電気事業法による規制の影響を受けると判断し、図 5 のような整理を行った。また、「電気用品安全法」は一般用電気工作物に関する規制であるが、それらは事業用電気工作物の一部としても使用されているため、図 5 のように理解した。

次に工事段階については、両者とも「電気工事士法」と「電気工事業法」の規制を受けており、一般用電気工作物の場合は、工事へ従事するものが第一種電気工事士である必要はなく、この点が両者における主な相違点である。

また維持運用段階の規制については、主に「電気事業法」で規定されていることが理解できる。

表 1　電気工作物に関する技術基準の分類

電気工作物の区分	事業用電気工作物	一般用電気工作物	鉄道に関するもの	原子力発電工作物
技術基準を定める法令	電技省*		鉄技省***	原電技省****
		電用技省**		
解釈・解説等	・電技省解説***** ・電技解釈****** ・電技解説*******	・電用技省解釈********	・鉄技省解釈**********	

＊：電気設備に関する技術基準を定める省令,

＊＊：電気用品の技術上の基準を定める省令,

＊＊＊：鉄道に関する技術上の基準を定める省令,

＊＊＊＊：原子力発電工作物に係る電気設備に関する技術基準を定める省令[10],

＊＊＊＊＊：電気設備に関する技術基準を定める省令の解説,

＊＊＊＊＊＊：電気設備の技術基準の解釈,

＊＊＊＊＊＊＊：電気設備の技術基準の解釈の解説,

＊＊＊＊＊＊＊＊：電気用品の技術上の基準を定める省令の解釈について,

＊＊＊＊＊＊＊＊＊：鉄道に関する技術上の基準を定める省令等の解釈基準

表 2　電気工作物の区分[11)]

<table>
<tr><td colspan="5">電気工作物
（電気を供給するための発電所、変電所、送配電線路をはじめ、工場、ビル、住宅などの受電設備、屋内配線、電気使用設備などの総称）</td></tr>
<tr><td colspan="4">事業用電気工作物
（電気事業用や自家用電気工作物の総称）</td><td rowspan="4">一般用電気工作物
一般住宅や小規模な店舗、事業所などの電圧 600 ボルト以下で受電する場所の配線や電気使用設備など</td></tr>
<tr><td rowspan="3">電気事業用電気工作物
電気事業者の発電所、変電所、送電線路、配電線路など</td><td colspan="3">自家用電気工作物
一般用及び電気事業用以外の電気工作物
（工場やビルなど、電気事業者から高圧以上の電圧で受電している事業場等の電気工作物）</td></tr>
<tr><td rowspan="2">工場等の需要設備以外の発電所、変電所など</td><td colspan="2">需要設備</td></tr>
<tr><td>最大電力 500 キロワット以上のもの</td><td>最大電力 500 キロワット未満のもの</td></tr>
</table>

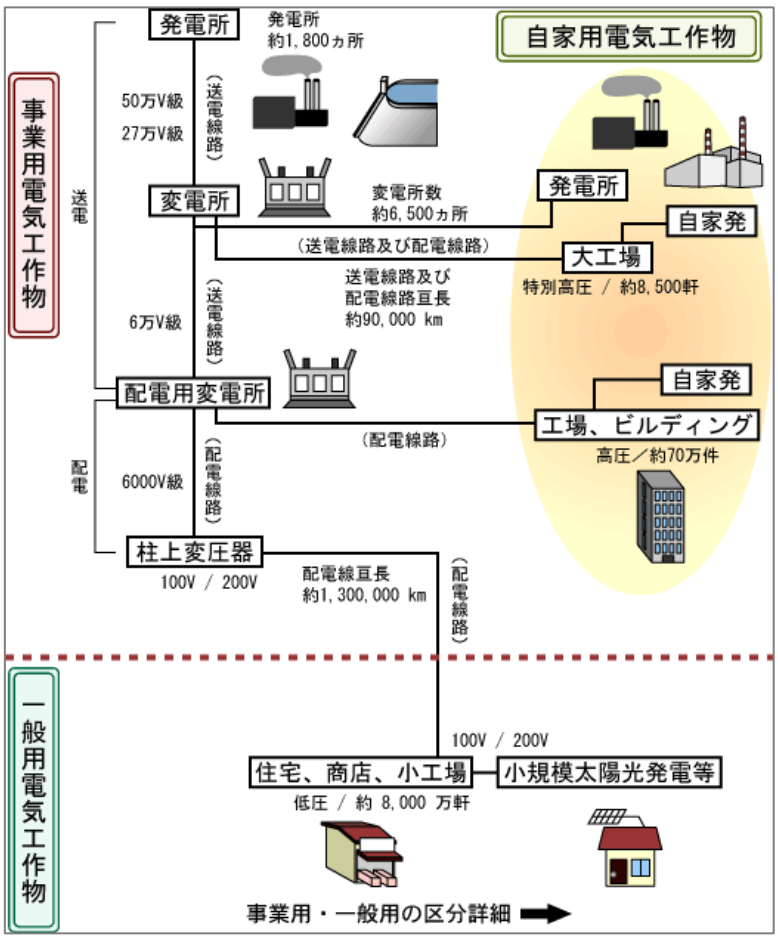


図 6　電気工作物の区分[11)]

２－２　電線とケーブルの違いについて

ここでは電線とケーブルの違いについて、言葉の定義を比較することで、違いを明確にする。以下、経済産業省の「電気設備に関する技術基準を定める省令」等に基づき、電線関連の定義、解釈、および解説等を紹介していく（表 3、表 4 参照）。

表 3　電線の定義、解釈または解説の一覧 [4),6),7),8)]

用語	規制文書	定義、解釈または解説
電線	電技省*	強電流電気の伝送に使用する電気導体、絶縁物で被覆した電気導体又は絶縁物で被覆した上を保護被覆で保護した電気導体をいう。
	電技省解釈**	強電流電気の伝送に使用するもののみを指す用語である。強電流電気とは弱電流電気に対応する用語であり、弱電流電気（電信、電話等の用に供される低電圧微少電流のものをいう。）以外のものをいう。
	電技解釈***	
	電技解説****	単に電線というときは、弱電流電気以外の強電流電気の伝送に使用するものを指している。概念的にいえば、電信・電話等の用に使用される低電圧微小電流のものが弱電流電気であり、それ以外のものが強電流電気である。電信・電話等の電気回路以外では、次のようなものを弱電流電気回路と考える。 ① インターホン、拡声器等の音声の伝送回路 ② 高周波又はパルスによる信号の伝送回路 ③ 最大使用電圧が 10V 以下で使用電流が 5A を超えない電気回路 ④ 短絡電流が 1mA 程度以下の電気回路 ⑤ 電圧の最大値が 60V 以下の直流電気回路で第 181 条に規定する小勢力回路に準じたもの ⑥ 電力保安通信線であって、最大使用電圧が 110V 以下で短絡電流が 100mA 以下の電気回路

＊：電気設備に関する技術基準を定める省令

＊＊：電気設備に関する技術基準を定める省令の解説

＊＊＊：電気設備の技術基準の解釈

＊＊＊＊：電気設備の技術基準の解釈の解説

表 3 は「電技省」における「電線」の定義、「電技省解釈」における「電線」の解釈、「電技解説」における「電線」の解説、を一覧に整理している。

「電気事業法」を遵守するための技術基準「電技省」において、「電線」とは「強電流電気の伝送に使用する電気導体、絶縁物で被覆した電気導体又は絶縁物で被覆した上を保護

被覆で保護した電気導体」[4]と定義されている。この強電流電気について述べてみると、「電技省解釈」においては、「弱電流電気に対応する用語であり、弱電流電気（電信、電話等の用に供される低電圧微少電流のものをいう。）以外のものをいう。」[6]、との解釈がなされており、数値的な区別がなされているわけではないことを把握した。以下、「弱電流電線」と「光ファイバケーブル」について整理する。

表 4　弱電流電線及び光ファイバケーブルの定義、解釈または解説の一覧[4),6),7),8)]

用語	規制文書	定義、解釈または解説
弱電流電線	電技省令*	弱電流電気の伝送に使用する電気導体、絶縁物で被覆した電気導体又は絶縁物で被覆した上を保護被覆で保護した電気導体をいう。
	電技省令解釈**	弱電流電気の伝送に使用する電線であり、これを支持又は保蔵する工作物を合わせて、「弱電流電線路」として規定している。電信・電話やインターホン、拡声器等の音声の伝送回路等がこれに該当する。
	電技解釈***	弱電流電気の伝送に使用する電気導体、絶縁物で被覆した電気導体又は絶縁物で被覆した上を保護被覆で保護した電気導体（第 181 条第 1 項に規定する小勢力回路の電線又は第 182 条に規定する出退表示灯回路の電線を含む。）
	電技解説****	弱電流電線に小勢力回路の電線（→第 181 条）及び出退表示灯回路の電線（→第 182 条）も含むものとしている。これは、小勢力回路及び出退表示灯回路は、その電線がその他の強電流電気工作物との接近、交差等の場合において弱電流電線と同じであるためである。
光ファイバケーブル	電技省令*	光信号の伝送に使用する伝送媒体であって、保護被覆で保護したものをいう。
	電技省令解釈**	光信号の伝送に使用する伝送媒体であって保護被覆で保護したものであり、光ファイバは絶縁物であり、電磁誘導、静電誘導がなく、かつ、通信障害もないことから「弱電流電線」とは別に定義している。
	電技解釈***	
	電技解説****	

＊：電気設備に関する技術基準を定める省令

＊＊：電気設備に関する技術基準を定める省令の解説

＊＊＊：電気設備の技術基準の解釈

＊＊＊＊：電気設備の技術基準の解釈の解説

表 4 は「電技省」における「弱電流電線」と「光ファイバケーブル」の定義、「電技省解

釈」における「弱電流電線」と「光ファイバケーブル」の解釈、「電技解釈」と「電技解説」における「弱電流電線」の解釈またはその解説を示している。

ここでは「弱電流電線」から整理を始めると、「電技省」において「弱電流電線」とは、「弱電流電気の伝送に使用する電気導体、絶縁物で被覆した電気導体又は絶縁物で被覆した上を保護被覆で保護した電気導体」[4)]、と定義されている。また「電技省解釈」、「電技解釈」、および「電技解説」において、「弱電流電線」については「電信・電話等の用に使用される低電圧微小電流のものが弱電流電気であり、電信・電話やインターホン、拡声器等の音声の伝送回路等がこれに該当する。」[6)]、「弱電流電線に小勢力回路の電線及び出退表示灯回路の電線も含むものとしている。」[8)]などの解釈および解説が記述されている。なお、「光ファイバケーブル」については、「電技省」において「光信号の伝送に使用する伝送媒体であって、保護被覆で保護したものをいう。」[4)]と定義されているが、これは「光ファイバは絶縁物であり、電磁誘導、静電誘導がなく、かつ、通信障害もないことから「弱電流電線」とは別に定義している。」[6)]という解釈から、「弱電流電線」との差別化を図るためであると思われる。

電線とケーブルの定義に関するまとめ

ここまでに紹介してきた定義については、電線とケーブルの関連法令等[2),3),4),5),6),7),8)]の中から、「電線」または「ケーブル」といった表記を抽出したものである。したがって、あくまで関連法令のレベルでは「電線」と「ケーブル」の違いについて、明確な定義による区別がなされているわけではないことを把握した。

しかし、「電技解説」においては「電線とは、強電流電気の伝送を目的とした電気導体（裸電線）、絶縁物で被覆した電気導体（絶縁電線、平形導体合成樹脂絶縁電線、多心型電線及びコード）又は絶縁物で被覆した上を保護被覆した導体（ケーブル、キャブタイヤケーブル）である。」[8)]という記述があり、「一般にケーブルと言えば、通信用ケーブルも含まれているものと理解される。しかしながら、電線として低圧の電路に使用するものと、高圧の電路に使用するものについては、別途満足すべき性能が規定されているため、通信用ケーブルで代用することができない。また接地線に使用するものについては、接地線は省令（電技省）における定義上の電線ではないので、特に「ケーブル（通信用ケーブルを除く。）」と表現している。また、一般に低圧ケーブルというのは、使用電圧が低圧の電路の電線に使用することができるケーブルという意味で、使用電圧が高圧及び特別高圧の電路に使用できるケーブルを低圧ケーブルとして低圧電路に使用しても支障はない。これは、高圧ケーブルと特別高圧ケーブルの関係についても同様である。」[8)]といった説明がなされている。

したがって、電線とケーブルをあえて区別する場合には、前者を「強電流電気の伝送を目的とした電気導体（裸電線）、または絶縁物で被覆した電気導体（絶縁電線、平形導体合成樹脂絶縁電線、多心型電線及びコード）」、後者を「電気導体を絶縁物で被覆し、その上から

保護被覆を施したもの（ケーブル、キャブタイヤケーブル）」、というように区別すればよい。

以上のことから電線とケーブルの違いについては、「電気導体の上を絶縁物で被覆したものが電線であり、電気導体の上を絶縁物で被覆し、かつ、その上を保護被覆したものがケーブルである。」、という違いがあることを把握した。以下、両者の違いについて図示する（図7参照）。

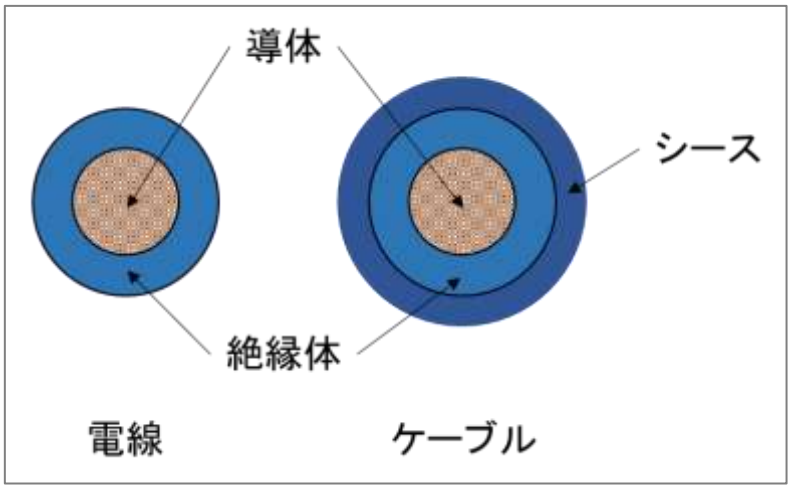


図 7　電線とケーブルの違い（左：電線，右：ケーブル）

２－３　電線とケーブルの基本構造

電線やケーブルの構造については、その種類や用途によって多様性があり、それらの全てを体系的に整理することは容易ではない。したがって、ここでは代表的な基本構造を持つものとして「高圧 CV ケーブル」を選別し、その構造や構成要素の機能について、詳細にまとめることにした。また、その他の電線やケーブルについては、主な構造別に図や写真を用いて示すことで、それらの構造を把握できるよう、工夫を凝らしたつもりである。

●　電圧の種類

電線とケーブルの基本構造の前に、日本における電圧の話へ触れることにする。現行の「電気事業法」においては、電圧の高低による規制段階として、電圧レベルを 3 種類に分類しているが、これらの限界値となる電圧値は、危険の程度と実用上の必要性を考慮して定められたものであり、必ずしも理論的に導き出された数値ではない[8)]。以下、表 5 へ日本における電圧の種類と、米国における電圧の種類を一覧にして整理した。

表 5　日米における電圧の種類とその限界値[4),6),12)]

日本		米国	
電圧の分類	電圧の限界値	電圧の分類	電圧の限界値
低圧	750 V*または 600 V**以下	Low	Up to 600 V
高圧	751 V*または 601 V**以上、7,000 V***以下	Medium	601 V to 15,000 V
特別高圧	7,001 V 以上***	High****	15,001 V and greater

＊：直流の場合，＊＊：交流の場合，＊＊＊：直流と交流の扱いは同じ，＊＊＊＊：米国の原子力発電工作物において、一般に使用されることはない（恐らく日本でも同様と思われる）。例外として、ケーブル母線や開閉所または変電所の中で使用される場合がある。

表 5 で日本と米国を比較してみると、段階ごとの限界値に差異があるものの、「低圧」のレベルに限定して言えば、両者の限界値に差異はないことが理解できる。また日本における「高圧」の限界値については、直流交流ともに 7000V となっており、それを超えるものについては「特別高圧」として分類されている。一方、米国における「中圧（Medium）」の限界値は 1.5kV となっている。したがって、日本における「高圧」と「特別高圧」については、米国における「中圧（Medium）」と「高圧（High）」の分類に跨る形で、電圧レベルが分類されていることを把握した。したがって、その他の国についても、電圧の分類に関する限界値は、日本と異なっていることが予想され、諸外国と電圧のレベルを比較する際にはこの点に留意するべきである。

● CV ケーブルの構造[13)]

CV ケーブル（Crosslinked polyethylene insulated polyvinyl chloride seathed cables）とは、「架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル」のことである。すなわち、絶縁材料には架橋ポリエチレン、シース材料にはポリ塩化ビニル（PVC）、を使用した電気導体のことを指している。その歴史背景としては、ポリエチレンを架橋する技術が 1957 年頃に導入されたことに伴い、取扱いの容易さ（維持管理や敷設時に特殊技能を必要としない）等から、現在へ至るまでに主流ケーブルの 1 つとして、様々な分野で多用されることになった。

CV ケーブルの構造は、基本的には導体、絶縁体、遮へい層（高圧 CV ケーブルの場合）および外装（以下、シース）によって構成されている。これらに対しては、必要に応じて「がい装」および「防食層」が施される場合もある。ここでいう「がい装」とは、ケーブルを構成する「外装（シース）」のことではなく、ケーブルの外装の上を覆う「鎧装」の意味である。したがって「がい装」の材料には、主に金属を用いることが多い。また、シースを施した状態の構造は、単心形、3 心一括シース形、単心ケーブルを 3 本より合わせたトリプレックス形（CVT）等に分類することができる。単心ケーブルおよびトリプレックス形は、終端や接続作業の処理方法のプレハブ化への対応の容易さ、ケーブルの地絡事故や短絡事故に移行しにくい、といった利点がある。高圧 CV ケーブルの構造を図 8 へ示す。なお、低圧ケーブルの場合は、②内部半導電層、④外部半導電層、⑤金属遮へい層が不要となる。

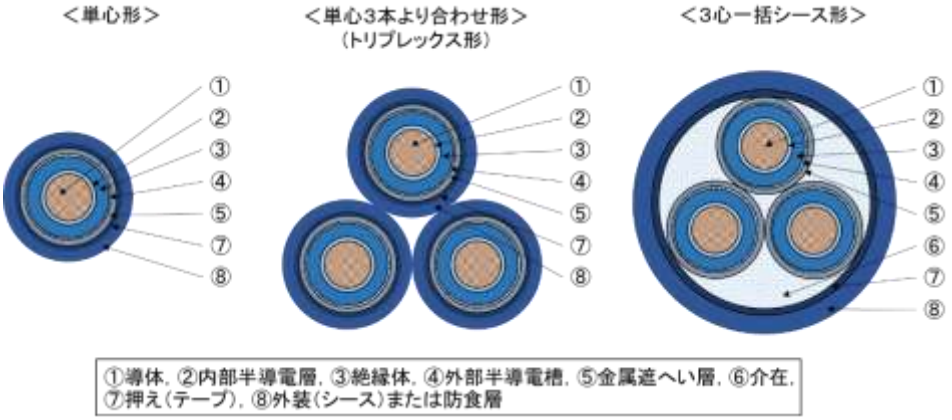


図 8　代表的な高圧 CV ケーブルの構造例[14)]

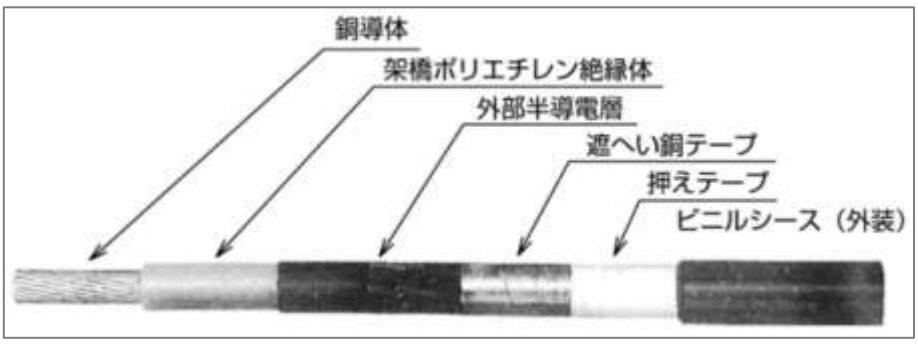


図 9　高圧 CV 単心ケーブル[15)]

①導体

現在の導体材料には、銅およびアルミが使用されている。特に銅は優れた導電率および機械的性質を有し、化学的にも安定した金属であるため、あらゆる用途で使用されている。またアルミについては、導電率および機械的性質の観点から、一般的に EC グレードアルミの硬アルミ線が使用されている。なお、アルミ線を敷設する場合は、接続端子や工具等にアルミ専用のものを使用することに留意されたい。導体の構造については、図 10 へ示した。

図 10　導体の構造 [13)]

②内部半導電層（高圧 CV ケーブルの場合）

内部半導電層には、繊維質（布）テープに導電材を塗りつけたもの、ポリエチレンにカーボンを混入した押出形のもの、両者を組み合わせた構造のもの、の 3 つが存在している。これらは金属ではないものの、一般に電圧の面から考えれば導体と同様に扱うことができる（導体と内部半導電層における電位差はゼロ）。これらの使用目的は以下の通りである。

・表面電位傾度を小さくする。

導体の表面は、小さな凹凸の集まりであるため、電圧が凹凸の部分で不均一に加わってしまう。このため、内部半導電層を施すことにより、導体の表面を大きな円にして電圧が均一に加わるようにし、導体が部分的に大きな電圧を背負わないようにしている。つまり、単位絶縁体厚さ当たりに加わる電位傾度（電圧）をより小さくする効果がある。

・導体と絶縁体間の隙間を埋める。

ケーブルは負荷の変動に伴い、膨張および収縮を繰り返し、導体と絶縁体の間には何らかの隙間が生じる。導体内へ入り込んだ空気は、オゾンを発生させて絶縁体に悪影響をもたらす。したがって、架橋ポリエチレンは耐オゾン性に優れているが、直接オゾンにさらされることは避けるべきである。そのため、収縮に追従して内壁に密着するよう、半導電層を設けている。また高圧の場合においては、導体と絶縁体間に隙間があるとコロナ放電が生じることで、絶縁体の劣化が促進される。そのため、これらの防止対策として半導電層を設けている。

③絶縁体

CV ケーブルの絶縁材料に使用されている架橋ポリエチレンは、一般のポリエチレンに比べて、高温においてほとんど変形せず、耐熱性も高いという特徴がある。そのため、電力ケーブルに使用する場合、許容電流を大きく設けることができ、ポリエチレンの場合よりも小さなケーブルサイズを選択することができる。また、ポリエチレンはもともと耐油性および耐薬品性に優れているが、架橋ポリエチレンはさらにこの性質が改良されている。架橋反応させる方法として開発当初では、水蒸気（湿式架橋）が用いられていたが、水トリー劣化現象の問題点から、高温および高圧不活性ガス（乾式架橋）の利用が主流となった。なお、ポリエチレン絶縁ビニルシース（EV）ケーブルの導体最高許容温度は、連続使用時において 75℃、短絡時（瞬間時）において 140℃となっており、それに対して CV ケーブルの場合は、連続使用時において 90℃、短絡時（瞬間時）において 230℃であり、これらの違いは絶縁体の耐熱性能に依存していると考えられる。

【補足】水トリー現象

CV ケーブルの絶縁体が劣化すると、毛細管現象で水分が隙間に入り、電界の偏りが発生する。このときに樹木の枝が伸びるように劣化が進み、やがては絶縁破壊を起こす現象を水トリー現象という。なお、水トリーには、内部の導体から発生する内導水トリー、外部の半導電層から発生する外導水トリー、および絶縁物中に製造過程でできる微小のすき間や混入異物から発生するボウタイ状水トリーと呼ばれるものが存在する。

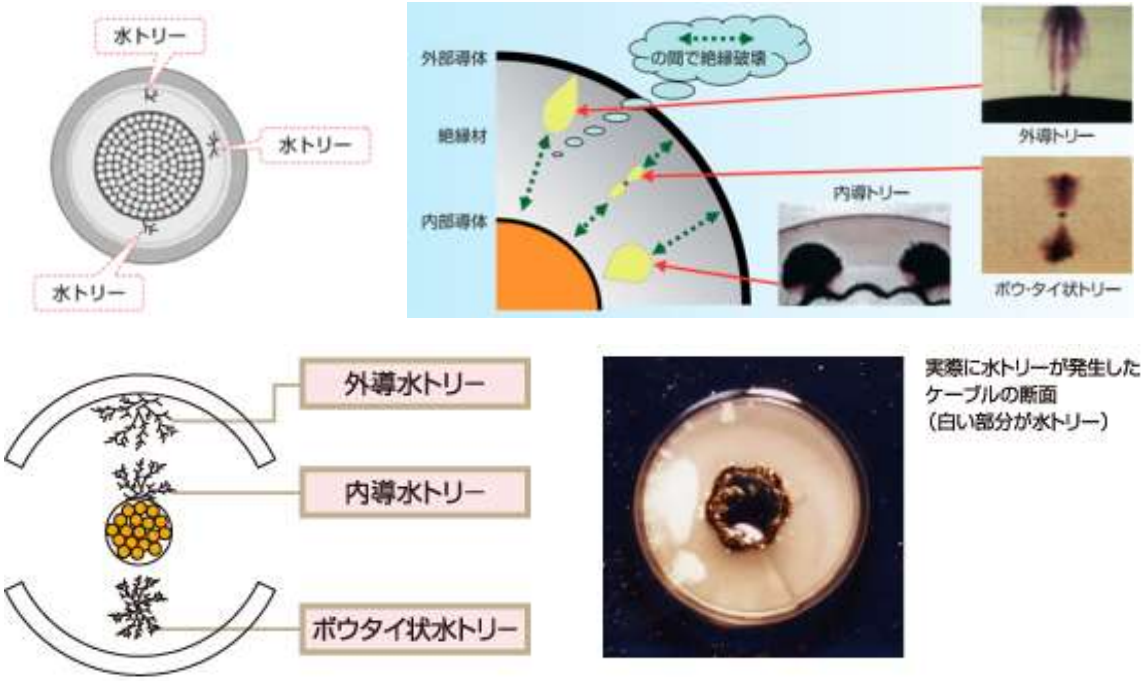


図 11　水トリー現象 [15),16),17)]

④外部半導電層（高圧ケーブルの場合）

外部半導電層の使用目的については、内部半導電層とほぼ同等であるが、特にコロナ放電の防止対策として有効である。高圧ケーブルの遮へい層には、一般的に銅テープを使用するが、絶縁体の表面へ銅テープを直接施すと、絶縁体との間に多少の隙間が生じてしまう。これによって電位分布が不均一となり、コロナ放電を発生する恐れがある。したがって、半導電層を絶縁体上に密着して施すことにより、その界面が同電位となり、コロナ放電の発生を防止することが可能となる。また外部半導電層には、一般的にテープ式と押出方式が存在しており、絶縁体と遮へい銅テープ間の緩衝材としての役割も果たしている。

⑤金属遮へい層

高圧 CV ケーブルには、保安上の問題およびケーブル性能向上の目的から、銅テープ等による金属遮へいを施す必要がある。また遮へい層を接地することで、電界遮へい、磁界遮へいの作用があり、通信線などの他の導体や機器への影響を抑制する効果がある。さらに故障電流、充電電流の通路としての機能も有する。なお、その使用目的は以下の通りである。

・絶縁体に加わる電界の方向を均一にすることで耐電圧特性を高める。
・導体間の短絡事故を防止する。
・介在物に電界が加わることで tan δ が大きくなることを防止する（参考資料に基づく記述ではあるものの、tan δ が何を表しているのか、筆者には理解できていない）。
・遮へい層をケーブル終端接続部で接地することにより、感電防止ができる。

【補足】電界遮へい

電力線の高電圧がつくる電界中に通信線などがあると、静電容量によって通信線などに電圧が生じる。電界遮へいとは、静電誘導により通信線などに誘起される電圧を遮へいすることである。

【補足】磁界遮へい

電力線の大電流がつくる交番磁界（変化する磁界）中に通信線などがあると、通信線などに誘導電圧が生じる。磁界遮へいとは、電磁誘導により通信線などに誘導される電圧を遮へいすることである。

⑥介在（物）

介在物とは、ケーブルを丸く仕上げるために絶縁線心間に充填する材料のことである。主な材料としては、紙、天然繊維、化学繊維、ガラス繊維、天然ゴム混合物、合成ゴム又は合成樹脂などが使用されている。

⑦押え（テープ、または巻きテープ）

押え巻きテープとは、より合わせた線心等がより崩れないように、または機械的・電気的防護のために施すテープのことである[18]。また単に「押え」と呼ばれることもある。紙又はジュートその他の繊維質が使われている。

⑧外装（シース、または防食層）

CV ケーブルに使用されているビニルシースは、絶縁体の保護、水分等からの隔離を目的としている。ビニル（PVC）は、電気特性、耐薬品性に優れ、難燃性を有している。また可塑剤の配合によって、特性を広い範囲で変化させることができ、加工性もよく価格的にも安価で購入しやすい、ということも特徴である。最近では、さらに難燃性を有した難燃ビニル等も存在している。

２－４　電線とケーブルの種類

電線とは電気あるいは信号を送るための導体と、導体から電気が漏れるあるいは感電を防止するための絶縁体、それらを外傷などから保護するためのシース（外装または外部被覆材）から構成されている。ここではそれら製品の種類や概要について記述する。なお、表 6 には電線とケーブルの種類について、一覧として整理した。

図 12　様々な電線ケーブルの集合写真 [19)]

表 6　電線およびケーブルの種類 [14)]

番号	ケーブルの種類	論文中の参照箇所
1	裸線・裸導体	２－４－１
2	絶縁電線	２－４－２
3	低圧電力ケーブル	２－４－３
4	高圧・特別高圧電力ケーブル	２－４－４
5	制御ケーブル	２－４－５
6	通信ケーブル	２－４－６
7	情報ケーブル	２－４－７
8	同軸ケーブル	２－４－８
9	防災ケーブル	２－４－９
１０	光ファイバケーブル	２－４－１０
１１	分岐付きケーブル	２－４－１１
１２	キャブタイヤケーブル	２－４－１２
１３	コード	２－４－１３
１４	エコロジー電線・ケーブル	２－４－１４

２－４－１　裸線と裸導体

裸線・裸導体とは、その名の通り、電気導体のみで構成されたものであり、開放型の電気室の配線、避雷設備の導体に使われることが多い [14]。また架空電線路に使用する電線、支線、架空地線、保護線、保護網、電力保安通信用弱電流電線等の金属線や、接地線、架空共同地線、架空ケーブル、電力保安通信用ケーブルなどのちょう架用線（メッセンジャーワイヤ）へも使用されている [8]。

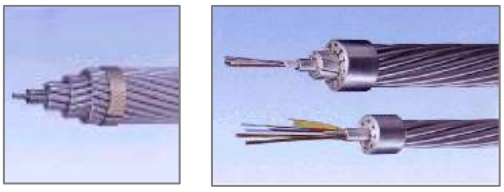


図 13　鋼心アルミより線（左）および光ファイバ複合架空地線 [19]

表 7　裸電線の種類と材料 [7]

裸電線の種類	材料（電気導体）
硬銅線	硬銅
軟銅線	軟銅
銅合金線 - けい銅線	銅、すず（たまに亜鉛）、けい素
銅合金線 - C 合金線	銅、ニッケル
銅合金線 - カドミウム銅合金線	銅、カドミウム
銅合金線 - 耐熱銅合金線	銅、銀
硬アルミ線	電気用アルミニウム地金
アルミ合金線 - イ号アルミ線	電気用アルミニウム地金、けい素、マグネシウム
アルミ合金線 - 高力アルミ合金線	「イ号アルミ線」と同じ（製造工程が少ない）
アルミ合金線 - 耐熱アルミ合金線	電気用アルミニウム、2～3 の元素
アルミ合金線 - 高力耐熱アルミ合金線	「高力、耐熱アルミ合金線」と同じ
銅覆鋼線 - 特別強力銅覆鋼線	鋼、銅（めっき方法など製造方法が異なる）
銅覆鋼線 - 強力銅覆鋼線	
アルミ覆鋼線 - 超強力アルミ覆鋼線	鋼、電気用アルミニウム地金（製造方法が異なる）
アルミ覆鋼線 - 特別強力アルミ覆鋼線	
アルミ覆鋼線 - 強力アルミ覆鋼線	
アルミ覆鋼線 - 普通アルミ覆鋼線	
アルミめっき鋼線	鋼、電気用アルミニウム地金
亜鉛めっき鋼線 - 超強力亜鉛めっき鋼線	鋼、亜鉛（製造方法が異なる）
亜鉛めっき鋼線 - 特別強力亜鉛めっき鋼線	
亜鉛めっき鋼線 - 普通亜鉛めっき鋼線	

２－４－２　絶縁電線

絶縁電線とは、導体と絶縁体で構成されている最も一般的なものである。またケーブルとは異なり、導体と絶縁体から成る線心をまとめた上に外装を施す（一括シース型)、というようなことがないため、単心、2 心、3 心等の区別はできない[8)]。絶縁体の種類には、ビニルやポリエチレンなど表 8 へ示したものがある。なかでも IV（600V ビニル絶縁電線、Indoor PVC の頭文字）は接地用としてよく使われている。またケーブルのように外装（シース）を施していないため、がい装（金属管による保護）を施すことも多い。

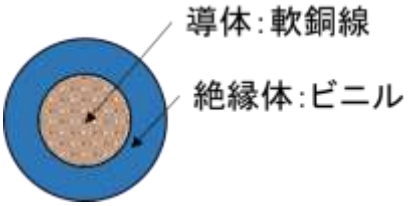


図 14　ビニル絶縁電線（IV）[20)]

表 8　絶縁電線の種類と材料[7)]

絶縁電線の種類	材料（絶縁体）
600V ビニル絶縁電線又は屋外用ビニル絶縁電線	ビニル混合物
600V ポリエチレン絶縁電線	ポリエチレン混合物
600V ふっ素樹脂絶縁電線	ふっ素樹脂混合物
600V ゴム絶縁電線	天然ゴム混合物、スチレンブタジエンゴム混合物、エチレンプロピレンゴム混合物、又はけい素ゴム混合物
高圧絶縁電線	ポリエチレン混合物又はエチレンプロピレンゴム混合物
特別高圧絶縁電線	架橋ポリエチレン混合物

表 9　主な絶縁電線の製品一覧[14)]

記号	品種	主な用途
IV	600V ビニル絶縁電線（JIS C 3307）	低圧屋内配線、制御回路、動力電灯回路と多岐に亘って用いられる。配線の際は金属管工事、碍子（がいし）引き工事などの配慮が必要である。他には接地線にもよく使用されている。

HIV	600V 二種ビニル絶縁電線（JIS C 3317）	IV と同様な取り扱いとされるが、絶縁体が耐熱配合としているため、高温雰囲気で使用できる。耐熱温度は 75℃である。
IK*1, KGB*1	600V けい素ゴム絶縁（ガラス編組）電線（JIS C 3323）	90℃までの高温雰囲気で使用される。ただし、金属電線管配線などで保護し、人が触れる恐れがないように布設する場合は、180℃まで使用できる。
K*2IV, HK*2IV	電気機器用ビニル絶縁電線（JIS C 3316）	電気機器内の配線で使われる。
DVF, DVR	引込用ビニル絶縁電線（JIS C 3341）	低圧架空引込み線（電柱より軒下まで）として使用される。平型の DVF と、より合わせ型の DVR がある。
OW	屋外用ビニル絶縁電線（JIS C 3340）	低圧の架空電線路に使用される。
OC	屋外用架橋ポリエチレン絶縁電線（電力用規格 C-107）	高圧の架空電線路に使用される。
PDC, PDP	高圧引下用絶縁電線（JIS C 3609）	6600V 以下の高圧架空電線路から柱上変圧器の一次側に至る引下げ線として使用される。
K*2IC	高圧機器内配線用架橋ポリエチレン絶縁電線（JIS C 3611）	6600V 以下のキュービクル式高圧受電設備内の配線で使用される。

記号一覧

IV：（屋内用）ビニル絶縁電線，HIV：二種（屋内用）ビニル絶縁電線，
DV2R:引込用ビニル絶縁電線 2 個より（線），DV3R:引込用ビニル絶縁電線 3 個より（線），
DV2F:引込用ビニル絶縁電線 2 心平形（線），DV3F:引込用ビニル絶縁電線 2 心平形（線），
OW：屋外用ビニル絶縁電線，OC：屋外用架橋ポリエチレン絶縁電線，
KIC：架橋ポリエチレン電線，K*1：けい素ゴム，V：ビニル，H：二種絶縁体のもの，
G：ガラス，P：EP（エチレンプロピレン）ゴム，C：架橋ポリエチレン，I：屋内用，
O：屋外用，D：引込用，K*2：電気機器用，PD：高圧引下用，B：編組，R：より（線），
F：平形（線），

２－４－３　低圧電力ケーブル

低圧電力ケーブルとは、導体をビニルやポリエチレンなどで絶縁したうえに保護被覆（シース）を施したもので、低圧引き込みから低圧機器への電力供給用として幅広く使用される。なかでも、幹線回路には CV・CVT が、室内の電灯・コンセント・スイッチ回路には VVF がよく使われる。

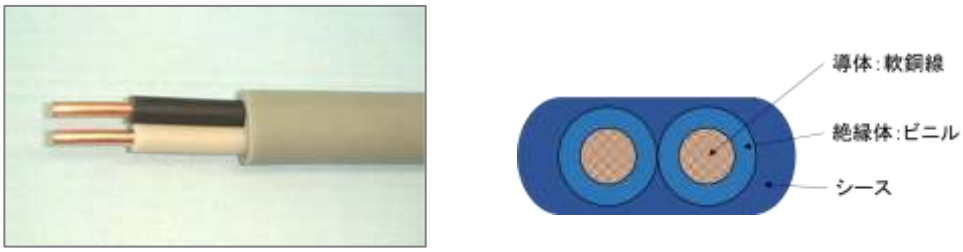


図 15　ビニル絶縁ビニルシースケーブル（平型，VVF）[19]

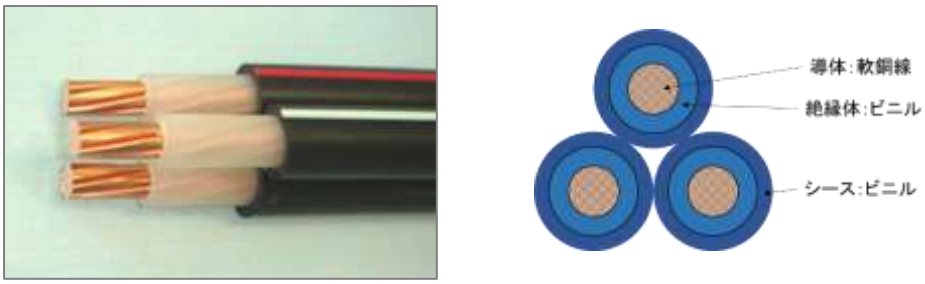


図 16　架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル [19)]

表 10　低圧ケーブルの種類と材料 [7)]

ケーブルの種類	材料（絶縁体）	材料（外装「シース」）
鉛被ケーブル	ビニル混合物、ポリエチレン混合物、天然ゴム混合物、ブチルゴム混合物、エチレンプロピレンゴム混合物、又はふっ素樹脂混合物	純度が 99.5%以上の鉛
アルミ被ケーブル		純度が 99.5%以上のアルミニウム
ビニル外装ケーブル		ビニル混合物
ポリエチレン外装ケーブル		ポリエチレン混合物
クロロプレン外装ケーブル		クロロプレン混合物

表 11　主な低圧電力ケーブルの製品一覧 [14)]

記号	品種	主な用途
VVF	ビニル絶縁ビニルシース平形ケーブル（JIS C 3342）	室内の電源・電灯・コンセント回路に幅広く使われている。
VVR	ビニル絶縁ビニルシース丸形ケ	屋内外の低圧配線で使われる。

	ーブル（JIS C 3342）	
600 V CV	架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル（JIS C 3605）	VVR と同様な取り扱いとされるが、電気特性に優れ、電流容量が多くとれるため、幹線に使われる。
600 V CVT	トリプレックス形架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル（JIS C 3605 準拠）	CV と同一用途であるが、単心をより合わせてあるため、施工性がよく 14 ㎜^{2}以上では CV より多く使われている。

記号一覧

V：ビニル，C：架橋ポリエチレン，R：丸形，F：平形，T：トリプレックス形

２－４－４　高圧電力ケーブルと特別高圧電力ケーブル

高圧・特別高圧電力ケーブルとは、電気事業者から高圧（6600V）または特別高圧（22000V または 33000V）で受電する時に使われるものである。また特別高圧の電気工作物は、技術的に高度のレベルで安全率も非常に高くとられるのが一般的であることから、特別高圧ケーブルについては、基本的な必要性能を示すのみとし、電気的遮へい層のあるものを使用することという概念的な規定にとどめ、ケーブルそのものについての絶縁性能規定はない。

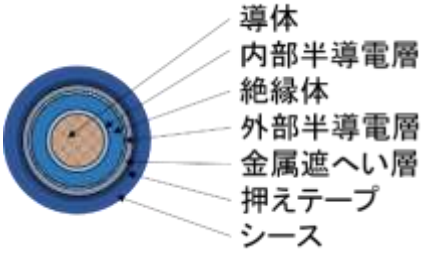


図 17　架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル（CV）[20]

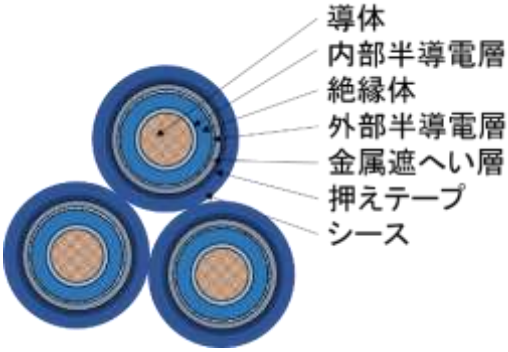


図 18　架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル（トリプレックス形，CVT）[20]

表 12　高圧ケーブルの種類と材料[7]

ケーブルの種類	材料（絶縁体）	材料（外装「シース」）
鉛被ケーブル	ポリエチレン混合物、天然ゴム混合物、ブチルゴム混合物、又はエチレンプロピレンゴム混合物	純度が 99.5%以上の鉛
アルミ被ケーブル		純度が 99.5%以上のアルミニウム
ビニル外装ケーブル		ビニル混合物
ポリエチレン外装ケーブル		ポリエチレン混合物
クロロプレン外装ケーブル		クロロプレン混合物

表 13　主な高圧・特別高圧電力ケーブルの一覧[14)]

記号	品種	主な用途
6kV CV	架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル（JIS C 3606）	6600V の高圧回路で使用される。
6kV CVT	トリプレックス型架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル（JIS C 3606）	6kV CV と同様な取り扱いとされるが、取扱い性のよさと、許容電流が大きくとれるため、6kV CV より多く使われる。ただし、500 ㎜ 2 以上になると 6kV CV の単心がよく使われる。
22kV 33kV CV	架橋ポリエチレン絶縁ビニルシース単心ケーブル（電力用規格 A-216）	22000V または 33000V の特別高圧回路で使用される単心のケーブルである。
22kV 33kV CVT	トリプレックス型架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル（電力用規格 A-216）	22000V または 33000V の特別高圧回路で 60~500 ㎜ ^{2} が規定されている。

記号一覧

C：架橋ポリエチレン，V：ビニル，T：トリプレックス形

２－４－５　制御ケーブル

制御ケーブルとは、工場、発変電所等の 600V 以下の制御回路に使用されるものである。なお、静電誘導の影響を受けやすいところへ布設する場合には静電遮へいケーブル、電磁誘導の影響を受けやすいところへ布設する場合には電磁遮へいケーブルが使われる。

図 19　制御用ビニル絶縁ビニルシースケーブル [20)]

表 14　主な制御ケーブルの一覧 [14)]

記号	品種	主な用途
C*[2]VV	制御用ビニル絶縁ビニルシースケーブル（JIS C 3401）	機器の遠隔操作や自動制御を行う回路に使用される。
C*[2]VV-S	遮へい付制御用ビニル絶縁ビニルシースケーブル（JCS 4258）	静電誘導の影響を受けやすいところに使用する。
C*[2]VV-SCF	電磁遮へい付制御用ビニル絶縁ビニルシースケーブル（JCS 4258）	電磁誘導の影響を受けやすいところに使用する（〇〇-SCF：銅鉄シールド「電磁シールド」という特殊品との情報もあり）。

記号一覧

C*[2]：制御用，V：ビニル，S：銅テープ遮へい，SCF：銅・鉄テープ遮へい

２－４－６　通信ケーブル

通信ケーブルとは、電話回路、放送回路、インターホン回路などで使用されるものである。

図 20　通信ケーブル [19),20)]

表 15　主な通信ケーブルの一覧 [14)]

記号	品種	主な用途
CCP-P CCP-AP	市内 CCP ケーブル（JCS 9072）	電話局から市内配線用として使用される。
TKEV	構内用ケーブル（JCS 9070）	建築物内部の電話幹線および室内の配線に使用される。
BTIEV	ボタン電話用屋内ケーブル（JCS 9071）	ボタン電話用の配線として使用される。
TOEV-SS	屋外用電話ケーブル	引込用の電話線に使用される。
TIEV	屋内用電話ケーブル（JCS 9068）	室内の電話配線に使用される。
CPEV	市内対ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル（JCS 5224）	電話用の幹線、室内の配線に使用される。60V 以下の制御回路にも使用される。ただし、最近は識別のしやすさから FCPEV がとって代わっている。
FCPEV	着色識別対ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル（JCS 5402）	電話用の幹線、室内の配線に使用される。60V 以下の制御回路にも使用される。

記号一覧

JCS についてはフリーアクセスできないため、記号の詳細は不明である。

２－４－７　情報ケーブル

情報ケーブルとは、主に LAN（Local Area Network：同じ建物の中にあるコンピューターや通信機器、プリンタなどを接続し、データをやり取りするネットワーク。「構内通信網」と訳されることもある。より対線や同軸ケーブル、光ファイバなどで配線するものを「有線 LAN」、電波を用いるものを「無線 LAN」という。）の配線に使用されるものである。

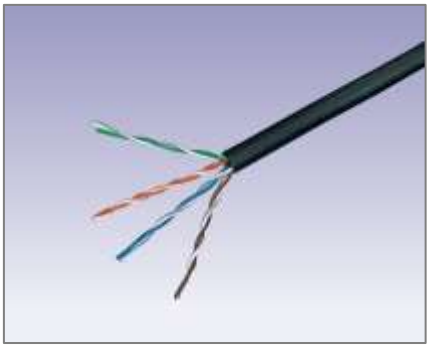


図 21　カテゴリー5 ケーブル [20)]

表 16　主な情報ケーブルの一覧 [14)]

記号	品種	主な用途
EBT	電子ボタン電話用ケーブル カテゴリー3 相当（JCS 5504）	10 BASE-T に使うことができるが、電話回路に主に使われている。
UTP 5	カテゴリー5 ケーブル（TIA/EIA 568 A.5）	100 BASE-T に使われる。
UTP 5 E	エンハンスドカテゴリー5 ケーブル（TIA/EIA 568 B.2）	100 BASE-T および 1000 BASE-T に使われる。
UTP 6	カテゴリー6 ケーブル（TIA/EIA 568 B.2）	1000 BASE-TX に使われる。

２－４－８　同軸ケーブル

同軸ケーブルとは、テレビ受信用およびテレビモニタ用に使用されるものである。

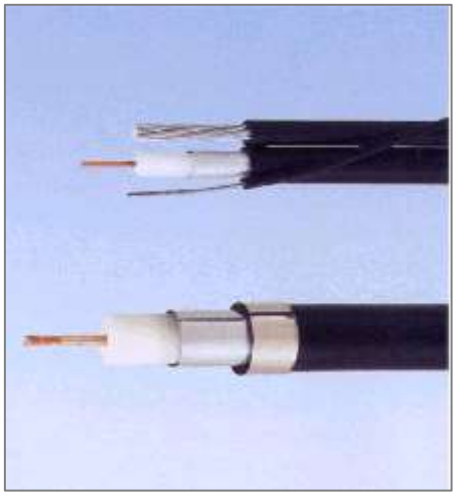


図 22　CATV 同軸ケーブル [19)]

表 17　主な同軸ケーブルの一覧 [14)]

記号	品種	主な用途
EFCX-HFL	CATV 用高発泡ポリエチレン絶縁アルミラミネートシース同軸ケーブル（JCS 5058）	CATV の屋外の回路に使われる。
S-4,5,7 C-FB	テレビ受信用同軸ケーブル（JIS C 3502）	テレビ受信用配線に使用される。
5C-2V	高周波同軸ケーブル（JIS C 3501）	TV モニタ機器間の伝送路に使われる。

記号一覧

EFCX：絶縁体が発砲ポリエチレンの同軸ケーブル，HF：高発泡プラスチック絶縁，
L：ラミネートシース，S：衛星放送受信用，C：特性インピーダンス 75Ω，
F：発砲ポリエチレン絶縁，B：アルミニウムはく張付けプラスチックテープに編組を施した外部導体，2 項の文字 C：特性インピーダンス 75Ω，V：外部導体が一重ビニルシース

２－４－９　防災ケーブル

防災ケーブルとは、消防用防災システムの配線に使用されるものである。なお、耐火ケーブルは非常用電源回路に、耐熱ケーブルは 60V 以下の制御回路、非常用通信および信号回路に、警報用電線は、自動火災報知器の感知回路に使われる。

表 18　主な防災ケーブルの一覧 [14)]

記号	品種	主な用途
FP FP-C	耐火ケーブル（JCS 4506）	消防用設備の電源回路に使われる。
HP	耐熱ケーブル（JCS 3501）	消防用設備の起動装置、警報装置、放送設備などの配線に使用される。
AE	警報用電線（JCS 4396）	自動火災報知器の感知回路に使われる。

２－４－１０　光ファイバケーブル

光ファイバケーブルとは、情報ケーブルの１つである。近年、情報通信の分野で写真や映像を送る場合が多くなり、大きな伝送容量が必要となる機会が増えてきた。それに追随する形で伝送容量が大きく、無誘導、低損失に優れた光ファイバケーブルが使われるようになってきている。

図 23　光ファイバケーブル [19)]

２－４－１１　分岐付きケーブル

分岐付きケーブルとは、工場であらかじめ分岐加工または回路を組んであるものであり、ビル・集合住宅・工場・学校などの低圧配線で広く使われる。最近は、通信・同軸ケーブル・LAN 用の分岐付きケーブルもよく使われる。

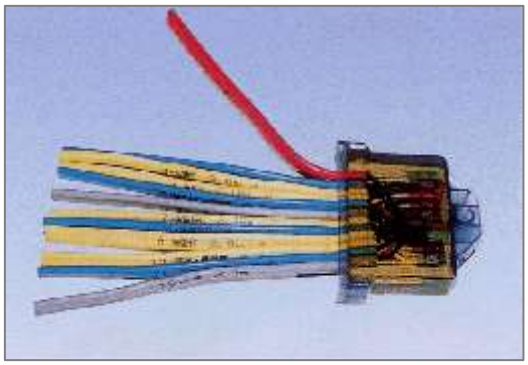


図 24　屋内配線用ユニットケーブル [19)]

表 19　主な分岐付きケーブルの一覧 [14)]

記号	品種	主な用途
MB	分岐付ケーブル（JCS 4376）	600V CVT を幹線および分岐線に使い、縦幹線用低圧回路に幅広く使われる。
—	通信用分岐付ケーブル（JCS 5424）	集合住宅やホテルなどの電話幹線に使われる。
UB	屋内配線用ユニットケーブル（JCS 4398）	各部屋の電源・電灯・コンセント・スイッチなどの回路を工場で組み、現場での結線作業が不要なため、多くの集合住宅で使用されている。

２－４－１２　キャブタイヤケーブル

キャブタイヤケーブルとは、主として鉱山、工場、農場等で使用される移動用電気機器及びこれに類する用途に使用される機械器具に接続されるものであり、耐摩耗性、耐衝撃性、耐屈曲性、耐水性に優れている。なお、低圧用のキャブタイヤケーブルの種類は、外装の絶縁物の種類によって複数が存在しており、多心のものについては、その構造によって 1 種から 4 種までに分類されている[8]。

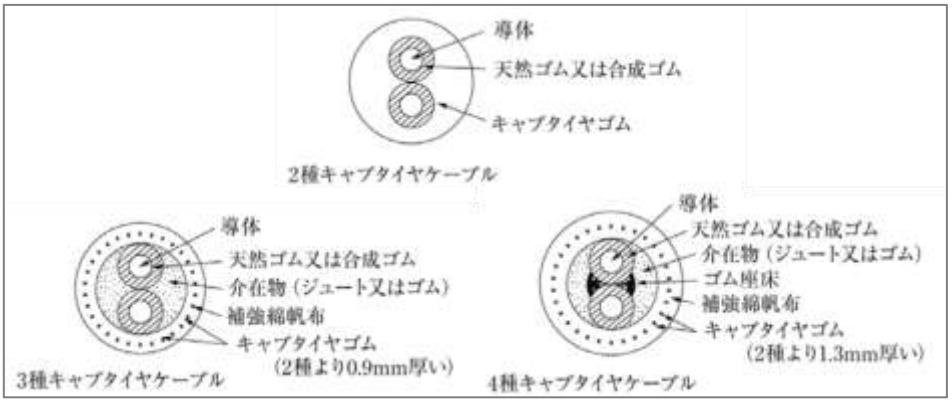


図 25　キャブタイヤケーブルの構造[7]

表 20　キャブタイヤケーブルの種類と材料（絶縁体）[7]

キャブタイヤケーブルの種類		材料（絶縁体）
低圧	ビニルキャブタイヤケーブル	ビニル混合物、ポリエチレン混合物、天然ゴム混合物、ブチルゴム混合物又はエチレンプロピレンゴム混合物
	耐燃性ポリオレフィンキャブタイヤケーブル	耐燃性ポリオレフィン混合物
	クロロプレンキャブタイヤケーブル	天然ゴム混合物、ブチルゴム混合物又はエチレンプロピレンゴム混合物
	クロロスルホン化ポリエチレンキャブタイヤケーブル	
	耐燃性エチレンゴムキャブタイヤケーブル	
高圧	クロロプレンキャブタイヤケーブル	ブチルゴム混合物又はエチレンプロピレンゴム混合物
	クロロスルホン化ポリエチレンキャブタイヤケーブル	

表 21　キャブタイヤケーブルの種類と材料（外装「シース」）[7)]

キャブタイヤケーブルの種類		材料（外装「シース」）
低圧	ビニルキャブタイヤケーブル	ビニル混合物
	耐燃性ポリオレフィンキャブタイヤケーブル	耐燃性ポリオレフィン混合物
	クロロプレンキャブタイヤケーブル	クロロプレンゴム混合物
	クロロスルホン化ポリエチレンキャブタイヤケーブル	クロロスルホン化ポリエチレンゴム混合物
	耐燃性エチレンゴムキャブタイヤケーブル	耐燃性エチレンゴム混合物
高圧	キャブタイヤケーブル	クロロプレンゴム混合物又はクロロスルホン化ポリエチレンゴム混合物

表 22　主なキャブタイヤケーブルの製品一覧[14)]

記号	品種	主な用途
VCT	ビニル絶縁キャブタイヤケーブル （JIS C 3312）	移動用電気機器の電源回路など、耐屈曲性の要求される場所で使用される。
2RNCT 2PNCT など	ゴム絶縁キャブタイヤケーブル （JIS C 3327）	VCT と同様な取り扱いとされるが、耐衝撃性、電灯回路など耐熱性が要求されるところに使われる。

記号一覧

VCT：ビニル絶縁キャブタイヤケーブル，

2RNCT：2 種天然ゴム絶縁クロロプレンゴムキャブタイヤケーブル，

2PNCT：2 種 EP ゴム絶縁クロロプレンゴムキャブタイヤケーブル，CT：キャブタイヤ，R：天然ゴム，P：EP ゴム（エチレンプロピレンゴム），N：クロロプレンゴム，H：クロロスルホン化ポリエチレンゴム，K：けい素ゴム，

２－４－１３　コード

コードとは、移動用機器の電源コードとして使用されるものである。現在一般に使用されているコードには、ゴムコード（単心、より合せ、袋打ち、丸打ち）、ビニルコード（単心、より合せ）、ゴムキャブタイヤコード、ビニルキャブタイヤコード、金糸コードなどがある。その他、環境に配慮したものとして、耐燃性ポリオレフィンコード、耐燃性ポリオレフィンキャブタイヤコードがあり、それぞれ機能的にはビニルコード、ビニルキャブタイヤコードと同様のものである。

ビニルコード、耐燃性ポリオレフィンコード、ビニルキャブタイヤコード及び耐燃性ポリオレフィンキャブタイヤコードは放電灯、ラジオ受信機、扇風機、電気バリカン、電気スタンド等の電気を熱として利用しない電気機械器具などに使用され、金糸コードについては、電気ひげそり、電気バリカン等の電気機械器具に限って使用することが可能である[8)]。

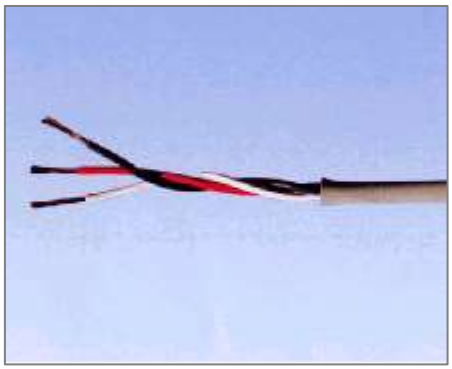


図 26　ビニルキャブタイヤケーブル[19)]

表 23　主なコードの一覧[14)]

記号	品種	主な用途
VCTF	ビニルキャブタイヤコード（JIS C 3306）	300V 以下の屋内に設置される小型電気機器に使用される。
NNFF など	ゴムコード（JIS C 3301）	耐熱性がよいのでアイロンなどの電熱器具に多く使用されている。

記号一覧

V：ビニル，SF：単心コード，TF：2 個よりコード，FF：平形コード，

CTF：キャブタイヤコード，N：クロロプレンゴム

２－４－１４　エコロジー電線（EM 電線）・ケーブル

エコロジー電線（EM 電線）・ケーブルとは、燃焼時にハロゲンガスなどの有害なガスを発生させず、鉛などの重金属を含まず、耐熱性を有する環境にやさしい絶縁電線またはケーブルである[14]。これらは法規上の定義が存在しないものの、（一社）日本電線工業会が国土交通省からの要請を受けて開発し、規格を定めたものである[83]。また EM という表記は、エコマテリアル「Ecomaterial」と耐熱性という意味であり[84]、日本電線工業会の HP を参照してみると、これらに関しては「電線・ケーブルが廃棄処理されたときに、環境に与える影響を抑え、鉛やハロゲンを含まず、耐燃性を有し、リサイクルし易い材料で構成されたもの、をＥＭ電線・ケーブルと称している」[84]、との説明が記載されている。構造的には、ビニルなどのハロゲンを含んだ材料を耐熱性ポリエチレンなどに置き換えたもので、外形寸法および使用用途は従来型電線・ケーブルと同じである。

表 24　主なエコロジー電線・ケーブルの一覧[14]

品種	従来型電線・ケーブル	エコロジー型電線・ケーブル	
	記号	記号	適用規格
絶縁電線	IV	IE/F	JIS C 3612
低圧電力ケーブル	VVF 600V CV 600V CVT	EEF/F 600V CE/F 600V CET/F	JIS C 3605 JIS C 3605 JIS C 3605
高圧電力ケーブル	6 kV CV 6 kV CVT	6 kV CE/F 6 kV CET/F	JIS C 3606 JIS C 3606
制御用ケーブル	CVV CVV-S	CEE/F CEE/F-S	JIS C 3401 JCS 4258
通信用ケーブル	TKEV TIEV FCPEV EBT	TKEE/F TIEE/F FCPEV/F EBT/F	JCS 9075 JCS 9074 JCS 5421 JCS 5504
情報用ケーブル	CAT5E CAT6	CAT5E/F CAT6/F	TIA/EIA 568 B.2 TIA/EIA 5868.2
同軸ケーブル	S-4, 5, 7C-FB	S-4, 5, 7-FB/F	JCS 5423
防災用ケーブル	FP-C HP AE	従来型も EM 仕様 HP/F AEE/F	JCS 4506 JCS 3501 JCS 4396
分岐付きケーブル	MB UB	MB/F UB/F	JCS 4427 JCS 4425
コード	VCTF	OO CTF/F	JCS 4509

記号一覧

E：ポリエチレン，/F：耐熱性（ただし、ハロゲン元素を含まず低発煙性のもの。）

以上、参考までにケーブルの用途分類に関するフローを図 27 に示す。

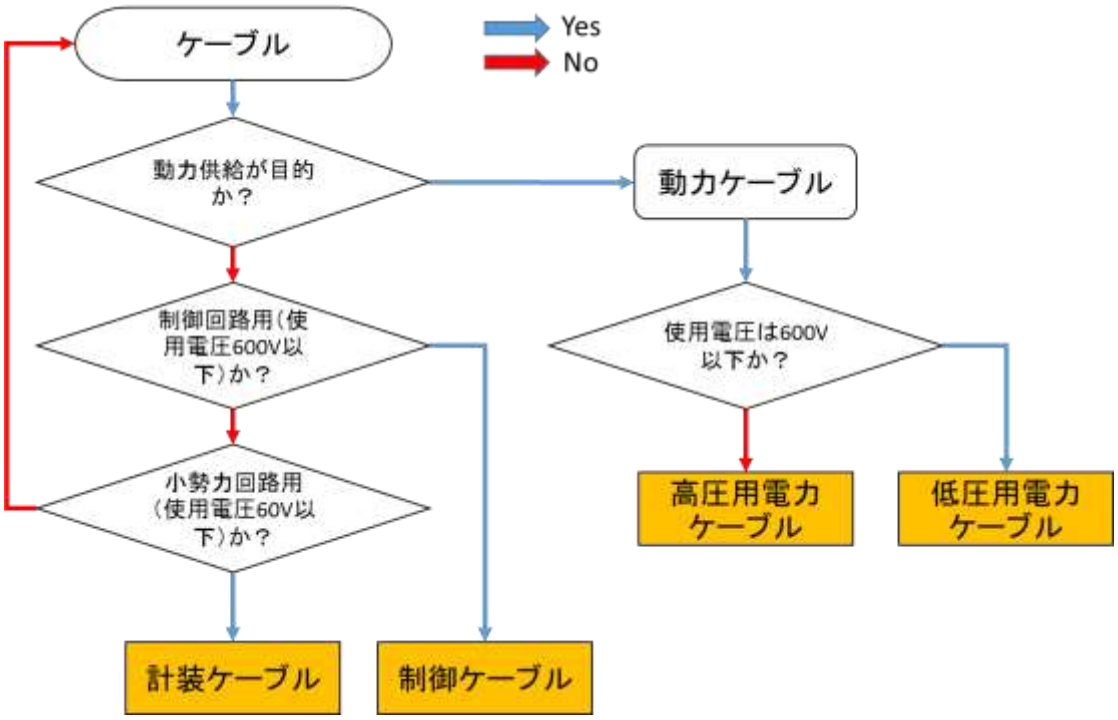


図 27　ケーブルの分類に関するフロー

なお、計装ケーブルとは「工場、発電所等において温度、圧力、流量、液位等の計測回路に用いられる定格 60V 以下のもの」[18]を指している。

２－５　電線とケーブルに関する国内外規格

電線とケーブルの役割については、電気を送る電力用と、信号を送る通信用に大別されるが、その種類は非常に多く、それぞれの用途に合わせて電線とケーブルを選定する必要がある。またそれらの材料、構造、加工方法、性能、試験方法等については、国際的に広く利用される国際規格で定められたものもあり、現状は各国の学協会等で定められている国内規格によるところが大きい。しかしながら、近年ではあらゆる分野で国際化が推進されていることもあり、国際規格との整合性を図る規格も増えてきている。以下、国内外における主な関連規格について、一覧として整理した（表 25、表 26 参照）。

表 25　電線とケーブルに関する国内規格 [21),22),23),24),25),26)]

規格名称	概要
日本工業規格（Japanese Industrial Standards、以下「JIS」という。）	日本工業標準調査会（Japanese Industrial Standards Committee、以下、「調査会」又は「JISC」という。）による調査審議を経て制定される規格である。なお、JIS はその性格から基本規格、方法規格、製品規格の 3 つに分類することができ、合わせて 19 の部門から構成されている（部門 A：土木及び建築，部門 C：電子機器及び電気機器、など）。
日本電線工業会規格（Japanese Cable Makers Association Standard、以下「JCS」という。）	㈳日本電線工業会（Japanese Cable Makers Association、以下「JCMA」という。）によって制定された規格である。主なものとしては電線の製品規格や材料規格、試験・検査標準や技術計算標準が挙げられる。JCS は JIS を補完する標準として、あるいは需要家団体などの要請による個別の目的をもつ規格として、100 件以上の規格が日本国内で広く利用されている。
電力用規格（電気事業連合会編）※電気事業連合会 HP には詳細なし。	電力会社で使用する電線の統一規格として電気事業連合会が制定した規格である。
防衛省規格（National Defense Standards、以下、「NDS」という。）	NDS とは、JIS が定められていない場合において、装備品等の標準化のため、必要があるときに防衛大臣が制定する技術的な標準をいい、JIS の規定に準じ、装備品等がその目的を果たすために備えなければならない要求事項、試験方法を定めている。なお、艦船などに使用する電線の規格も含まれる。

表 26　電線とケーブルに関する国外規格 [21),22),23),24),25),26)]

規格名称	概要
国際電気標準会議（International Electrotechnical Commission、以下、「IEC」という。）規格	IEC 規格とは、各国の代表的な標準化機関により構成される非政府間国際機関 IEC によって制定された国際規格である。電気通信分野を除いた電気・電子分野に関する国際的な標準化を行っており、日本では IEC 規格と JIS との整合化が図られている。

国際標準化機構（International Organization for Standardization、以下、「ISO」という。）規格	ISO 規格とは、各国の代表的な標準化機関により構成される非政府間国際機関 ISO によって制定された国際規格である。電気・電子分野および電気通信分野を除く全ての産業分野について、国際的な標準化を行っており、電線関係では、裸線(地金)自動車用電線などの規格が制定されている。また、日本では ISO 規格と JIS との整合性も図られている。
（米国)労働安全衛生局（Occupational Safety and Health Administration、以下、「OSHA」という。）基準	OSHA 基準とは、連邦規則に含まれる「法規」と位置付けられるものである。OSHA 基準の中で ANSI 規格（後述を参照）が参照文書として引用された場合、その ANSI 規格は OSHA 基準と同等の効力および影響を持つことになる。なお、本基準への適合性については、OSHA が認定した国家認定試験所の認証により、証明されなければならない。
米国規格協会(American National Standards Institute、以下、「ANSI」という。）規格	ANSI 規格とは、規格開発機構（Standards Developing Organizations、以下、「SDO」という。）が作成した規格の中から、ANSI によって米国国家規格として指定されたものである。原則として、ANSI 自身では規格作成は行わず、認定を得た SDO が作成・提出する規格を承認する形をとっている。なお、SDO に承認されている民間団体には以下のものがある。ASTM、UL、NEMA、NFPA（後述を参照)。
米国材料試験協会（American Society for Testing and Materials、以下、「ASTM」という。）規格	ASTM 規格とは、米国内における工業材料に関する仕様および試験方法の標準化を目的として制定された規格である。また、国家規格である ANSI 規格（ANSI/ASTM）として発行される ASTM 規格も存在している。
アメリカ保険業者安全試験所（Underwriters Laboratories Inc. 、以下、「UL」という。）規格	UL 規格とは、非営利試験機関 UL によって策定される製品安全規格である。材料･装置･部品･道具類などから製品に至るまでの、機能や安全性に関する標準化を目的としており、UL 規格の認証取得は任意であるものの、州や地方自治体レベルで UL 認定を義務付けている例も多く、アメリカの電気製品の多くは UL 認定品となっている。また、国家規格である ANSI 規格（ANSI/UL）として発行される UL 規格も存在している。
米国電機工業会（National Electrical Manufacturers Association、以下、「NEMA」という。）規格	NEMA 規格とは、NEMA によって標準化された、発電、送電、流通、制御およびエンドユーザー向けに使用されている電気製品に関する規格である。また、国家規格である ANSI 規格（ANSI/NEMA）として発行される NEMA 規格も存在している。
米国防火協会(National Fire Protection Association、以下、「NFPA」という。）規格	NFPA 規格とは、NFPA により制定される防火・安全設備および産業安全防止装置などに関する規格である。ANSI 規格（ANSI/NFPA）として採用されているものも数多く存在する。

２－６　電線とケーブルへ対する性能の評価項目

ここでは一般的な電線とケーブルへ課される性能の評価項目の中で、燃焼に関する項目が、どのような位置づけにあるのか、主要な国内規格から把握することを目的としている。したがって、以下には JIS C 3005（ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法）の規格内容を参考として（難燃の試験方法は 2-7-2-1 を参照）、性能の評価項目等を整理した（表 27 参照）。

表 27　JIS C 3005 における電線とケーブルの性能評価項目 [27)]

NO	項目	関連規格	NO	項目	関連規格
1	外観	JIS C 3005	16	絶縁体及びシースの引張り	JIS C 3005
2	条長	JIS C 3005 JIS B 7512 JIS B 7522	17	加熱	JIS C 3005 JIS K 7212
3	構造	JIS C 3005 JIS C 3002 JIS B 7502 JIS B 7503 JIS B 7184 JIS B 7516	18	耐油	JIS C 3005 JIS K 6258 ASTM D471
4	導体抵抗	JIS C 3005	19	巻付加熱	JIS C 3005
5	導通	JIS C 3005	20	低温巻付け	JIS C 3005
6	耐電圧	JIS C 3005	21	加熱収縮	JIS C 3005
7	絶縁抵抗	JIS C 3005	22	耐寒	JIS C 3005 JIS K 7216
8	静電容量	JIS C 3005	23	加熱変形	JIS C 3005 JIS K 6249 JIS B 7503 JIS B 7507
9	誘電正接	JIS C 3005	24	耐オゾン	JIS C 3005 JIS K 6251 JIS K 6259
10	商用周波長時間耐電圧 （交流長時間耐電圧）	JIS C 3005	25	架橋度	JIS C 3005 JIS K 8271
11	雷インパルス耐電圧 （衝撃耐電圧）	JIS C 3005	26	難燃	JIS C 3005
12	沿面耐電圧	JIS C 3005	27	曲げ	JIS C 3005
13	耐トラッキング	JIS C 3005	28	衝撃	JIS C 3005
14	表面漏れ抵抗	JIS C 3005	29	摩擦	JIS C 3005
15	導体加熱変色	JIS C 3005	30	より合せ	JIS C 3005

国内のゴム・プラスチック絶縁電線およびケーブルに関しては、表 27 に示した 30 種類の評価項目へ対する試験方法、評価基準等が項目ごとに定められている。その中でも、電線とケーブルの燃焼に関する評価項目としては、表中 NO.26「難燃」のみが課されており、その試験内容については後述するが、このことからは、一般的な電線とケーブルに関する火災安全への社会的関心が、期待したほど高くないことも読み取れる。したがって、本論文が対象としている「ケーブルの燃焼性状に関する内容は、電線とケーブルへ課される性能のうち、あくまで 1/30 程度にしか満たない範囲の内容である」ことを述べておきたい。

２－７　ケーブルの着火特性と燃焼特性に関する整理

電線とケーブルは、電力や通信、情報等の伝達経路として、あらゆる分野で使われており、産業や日常生活を支える基盤として、もはや必要不可欠なものである。したがって、用途ごとに想定され得る条件下において、電線とケーブルの機能性を検証する必要があり、そのための試験方法はあらゆる機関によって考案されている。なお、それらの多くは公的な規格として制定されているものも多く、その場合は各規格への遵守が義務づけられている。

また電線とケーブルの構成材料には、ゴム類、ビニル類およびポリエチレン類を始め、合成樹脂が多く使用されており、それらは一般に可燃性の材料である。したがって設計面においては、電線を燃えにくくする（いわゆる難燃性の構造にして難燃化する）ことも可能となるが、市場で流通している電線とケーブルの大部分は、難燃性といえども不燃ではない。つまり、たとえハイグレードの難燃性能を有する電線またはケーブルであっても、その境界条件が異なれば容易に燃えてしまうことに留意されたい。

このような背景から電線とケーブルに関しては、火災へ対する安全性能の評価手法として、要求性能ごとに様々な燃焼試験を課しているものの、それらの試験方法については、各国のあらゆる機関からの提案により、それらの内容も多岐に亘っている。したがって、その代表的なものを以下で紹介していくことにする。

２－７－１　電線とケーブルの火災安全に関する評価項目 [28)]

電線とケーブル、それらの構成材料へ対する火災安全性能の主な評価指標としては、以下の５つが存在している。

２－７－１－１　耐延焼性

耐延焼性とは、電線とケーブルの長手方向に対する燃え広がりにくさを表す指標である。例えばケーブルで火災が発生した場合は、その布設経路、すなわち長手方向に沿って火災が拡大していく。したがって、電線やケーブルの長手方向に対して、燃え広がり長さが短いものほど燃えにくい、という考え方に基づき、燃焼試験で評価されるものが耐延焼性である。

２－７－１－２　発煙性

発煙性とは、燃焼時の煙による視界悪化の度合いを表す指標である。一般に合成樹脂の燃焼では、煤や水蒸気等を含んだ煙が大量に発生する。したがって、電線とケーブルを構成する合成樹脂についても同様であり、煙の濃度すなわち煙による視界悪化の度合いについては、避難と消火活動へ影響する重要なファクターである。なお、煙による視界悪化の度合いについては、光の透過率によって示されており、燃焼試験で評価されるものが発煙性である。

２－７－１－３　発生ガスの毒性と腐食性

ガスの毒性とは、電線とケーブルの燃焼時における、構成材料の熱分解で発生するガスに

ついて、人体への有毒性の度合いを表す指標である。

一方、ガスの腐食性とは、燃焼時における発生ガスの中には、金属を腐食するガスも存在しており、その腐食性ガスの度合いを表す指標である。したがって、燃焼時に発生するガスについては、煙と同様に重要なファクターとして認識されており、燃焼試験によって評価されるものがガスの毒性と腐食性である。

２－７－１－４　発熱性

発熱性とは、電線とケーブルの燃焼時における熱の放出量について、時刻歴ごとに評価した指標である。したがって、可燃物がどのように燃えるかを定量的に把握することから、火災安全設計における最も重要なファクターとして挙げられており、燃焼試験によって評価されるものが発熱性である。

２－７－１－５　耐火性と耐熱性

ここでいう「耐火および耐熱性」とは、平成 9 年消防庁告示第 10 号「耐火電線の基準」および平成 9 年消防庁告示第 11 号「耐熱電線の基準」に規定されるもの、と解釈する。なお、これらの指標が表すものは、電線とケーブルの燃焼中における電気的な絶縁性能である。

通常の電線とケーブルの場合では、火災時に絶縁体が焼失して所定の絶縁性能を保てなくなる（機能を喪失する）が、上述の告示に定められた基準に合格する耐火電線や耐熱電線は、絶縁体の構造を工夫することで、燃焼時においても告示で定められた条件下において、一定時間は絶縁性能を保ち、通電が可能となるような性能を有している。なお、耐火電線の場合は、JIS A 1304（建築構造部分の耐火試験方法）に定める温度曲線に準じて、30 分間で 840℃に到達する加熱条件下における絶縁性能試験、耐熱電線の場合は、同温度曲線の 1／2 に準じて、15 分間で 380℃に到達する加熱条件下における絶縁性能試験を行い、それぞれ合格する必要がある。つまり耐火性や耐熱性とは、指定された条件の下で所定の機能を果たし得る、という性能であり、燃焼試験によって評価されるものが耐火性、耐熱性である。

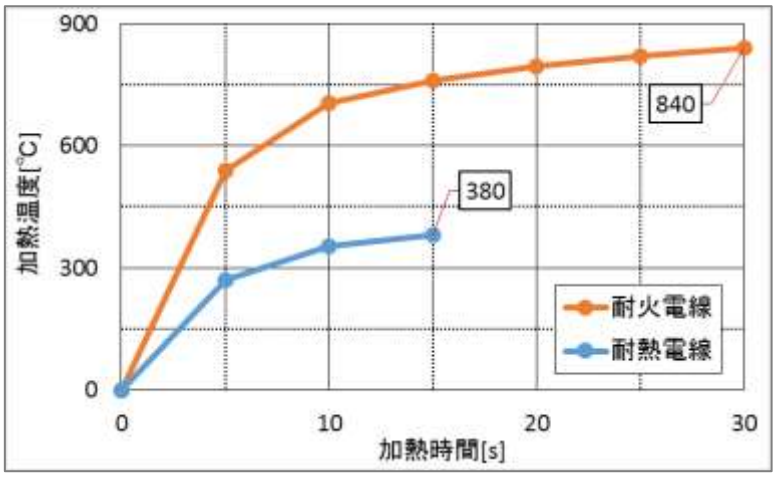


図 28　JIS A 1304 における加熱温度曲線 [29)]

２－７－２　電線とケーブルの燃焼試験方法

ここでは、電線とケーブルの主な燃焼試験について、それらの概要をまとめることにする。なお、表 28 にはそれらの種類について、一覧として整理している。

表 28　電線とケーブルの燃焼試験

評価項目	試験の種類	主な適応規格
耐延焼性	一条布設燃焼試験	UL1581, IEC60332-1, JIS C3005 等
	多条布設燃焼試験	JIS C3521, UL1685, IEC60332-2 等
	ライザー試験	UL 1666
	スタイナートンネル試験	ASTM E84
発煙性	スモークチャンバー試験	ASTM E662, ISO5659-2
	3m キューブ試験	IEC61034
燃焼時発生ガス	ハロゲン化水素, PH, 導電率試験	JCS7508, IEC60754-1, IEC60754-2
	毒性ガス試験	BS6853_Annex B.1, EN50305_9.2 項
発熱性	コーンカロリーメータ試験	ISO5660-1
耐火性・耐熱性	耐火試験	平成 09 年消防庁告示第 10 号
	耐熱試験	平成 09 年消防庁告示第 11 号

２－７－２－１　耐延焼性試験

耐延焼性の評価はケーブルの火災リスクを評価する上で最も重要な要素であり、電線とケーブルの使用目的や使用場所に応じて様々な試験方法が定められている。

- 一条布設燃焼試験

一条布設燃焼試験とは、耐延焼性試験の中では最もシンプルなもので、ブンゼンバーナー等の比較的小型の火源を使用したものである。また各試験方法によって、加熱条件は異なるものの、バーナの炎を試料へ当てた後にその炎を取り除き、試料に伝播した炎が自然に消えるかどうか、あるいは試料の焼損範囲が規定範囲内に収まるか、等の定性的または定量的な基準を基に性能の良し悪しを判定するように、その内容については類似している。以下、表 29 と図 29 へそれらの代表例の概要を示す。

表 29　一条布設燃焼試験の代表例 [30)]

試験規格	JIS C 3005	UL 1581 VW-1	IEC60332-1
試料の長さ	300 ㎜	610 ㎜以上	600 ㎜
試料設置方法	60°または水平 囲いあり（3 面）	垂直 囲いなし	垂直 囲いあり（4 面）
バーナ出力	規定なし （約 500W）	500W	1000W
接炎方法	試料の燃焼開始まで接炎（最長 30 秒間）	接炎 15 秒間／離炎 15 秒間を 5 回繰り返し	ケーブル外径に応じて規定された時間で接炎、外径 25 ㎜までは 60 秒間
判定基準	接炎終了後 60 秒以内に自然消火すること	接炎／離炎 5 回終了後 60 秒以内に自然消火すること、炎の伝播による支持旗燃焼と燃焼滴下物による脱脂綿の着火がないこと	焼損部（試料炭化の範囲）の上端が上部固定端から 50 ㎜以上離れており、そこから焼損部の下端までが 540 ㎜以下であること
備考		付録 A 参照	

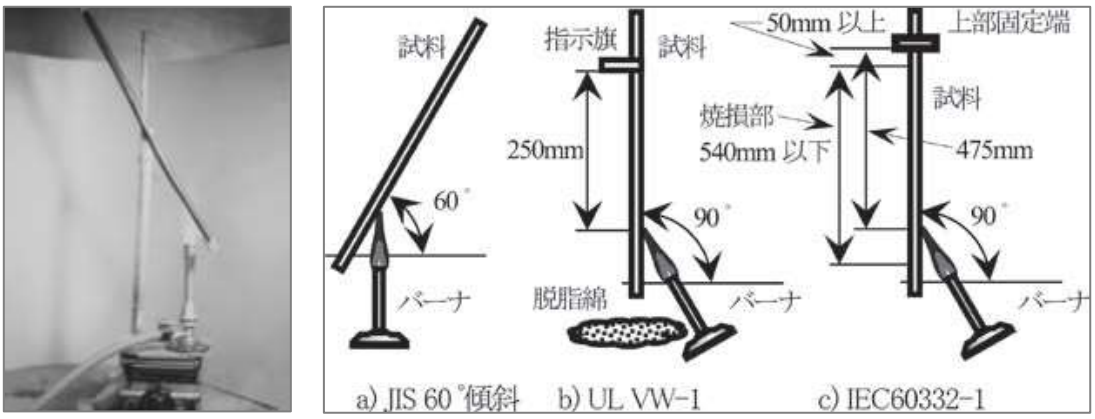


図 29　一条布設燃焼試験装置の概要（左：JIS C 3005 試験状況）[30),31)]

● 多条布設燃焼試験

一条布設燃焼試験の場合、電線とケーブルの耐延焼性を評価するために、長年に亘って標準的な試験方法として、世界中で適用されてきた実績がある。しかしながら、過去の火災事例の教訓からは、電線とケーブルが大量に束状で敷設された（グループケーブル）場合では、一条布設燃焼試験に合格したものであっても、ケーブルの耐延焼性は十分でないことが判明した。

特に工場プラントや発電所では、ケーブルラック、ダクト、ケーブルシャフト等へまとめて布設される場合が多く、それらが着火した際には、ケーブルの相互作用によって延焼し、高い発熱量を放出することが知られている。したがって、このような条件下におけるグループケーブルの耐延焼性を評価するための試験として、多条布設燃焼試験が開発されており、垂直トレイ試験、ライザー試験、スタイナートンネル試験などに大別することができる。

・<u>垂直トレイ燃焼試験</u>

垂直トレイ試験は、IEEE や UL 規格等の北米系規格と、国際規格（IEC）や欧州統一規格（EN）等の欧州系規格の 2 つに大別することができる。なお、北米系規格における代表的な燃焼試験については表 30 へ整理した。

表中の IEEE383-1974 とは、米国電気学会が制定した原子力発電所用ケーブルの試験基準であり、比較的早くに制定されたことから、耐延焼性試験の標準的な評価方法として、世界中で広く適用されてきたものである。日本においては、昭和 59 年（1984）に電話局の洞道内で大規模火災を経験したことから、IEEE383-1974 を参考とした JIS C 3521 が制定されており、通信ケーブル、耐火および耐熱電線等の耐延焼性の評価手法として適用されている。その他、様々な機関によって改良が加えられた種々の試験方法が存在している。なお、それらの原型となった IEEE383 における試験方法に関しては、2003 年に廃止となっており、その IEEE383 に代わる垂直トレイ燃焼試験としては、IEE1202 を適用するよう要求している。

またIEEE1202やUL1685については、より厳密な試験条件の設定を意図して、試験室の寸法や試験中の給排気の流量などが細かく規定されており、試験中に発生する煙濃度の測定がオプションとして規定されている。これらの試験では、規定本数のケーブルをラダー状の垂直に設置されたトレイへ規定の方法で布設し、トレイの下方より規定バーナでケーブルを燃焼させ、トレイ上方への延焼性能の評価がなされる。なお、火源としてのバーナ形状や火源の熱量については、両規格とも同様の値を採用している。

表 30　北米系規格における垂直トレイ試験の代表例[30)]

試験規格	JIS C 3521	IEEE383-1974	UL 1685	CSA FT4／IEEE1202
試料の長さ	2.4m	2.44m	2.44m	2.44m
バーナ公称出力	規定なし※	規定なし※	約 20kW	約 20kW
バーナ高さ（トレイ下端から）	600 mm	600 mm	457 mm	305 mm
試験時間	20 分	20 分	20 分	20 分
判定基準（試料炭化長）	トレイ上端まで炭化しないこと			バーナからの炭化長さが 1.5m 以下
煙濃度測定	無	無	有（オプション）	有（オプション）
備考		附則 A 参照		バーナは 20°上方に傾斜

※：バーナ公称出力ではなく、火炎の温度を規定（JIS は 815℃、IEEE は約 1500°F）

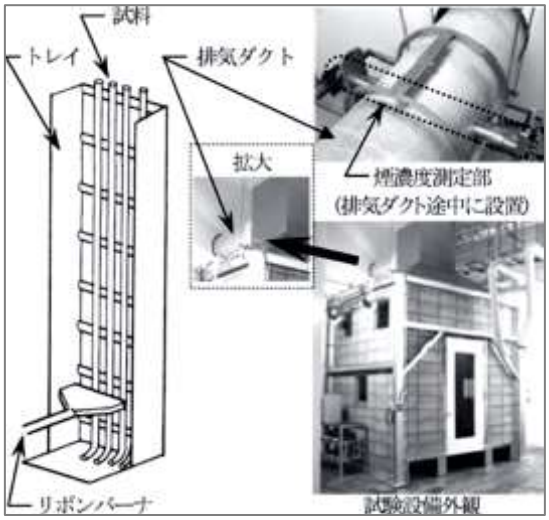


図 30　垂直トレイ燃焼試験装置の概要（左：IEEE383 等，右：UL、IEEE1202）[30)]

一方、欧州系規格における垂直トレイ試験の代表としては、IEC60332-3 が存在している。この試験は米国電気学会が制定した、原子力発電所用ケーブルの試験基準である IEE383-1974 をベースに開発されたもので、IEEE383 には規定されていなかった試験中の空気流量や燃焼バーナ出力などを規定して、より安定した試験条件の実現を図ったものである。IEEE383-1974 との最大の相違点は、垂直トレイを取り囲む燃焼チャンバの有無であり、IEC60332-3 では燃焼チャンバを規定することで、試験中の空気供給と燃焼ガスの排出が安定して行えるように改良が図られている。また表 31 にはその試験条件を示しているが、試料長さ 1m 当たりの非金属部の体積に応じて 4 つのカテゴリーに分類されている。加えて、カテゴリー毎の燃焼時間も定められており、導体断面に応じた方法でトレイへ布設し、試験を実施するという仕組みである。

表 31　IEC60332-3 の試験条件 [32)]

項目	カテゴリー						
	A		B		C		D
試料非金属部体積（l/m）	7	7	3.5	3.5	1.5	1.5	0.5
試料導体公称断面積（mm²）	＞35	≦35	＞35	≦35	＞35	≦35	
試料取付方法	間隔	密接	間隔	密接	間隔	密接	間隔
試験時間（分）	40	40	40	40	20	20	20

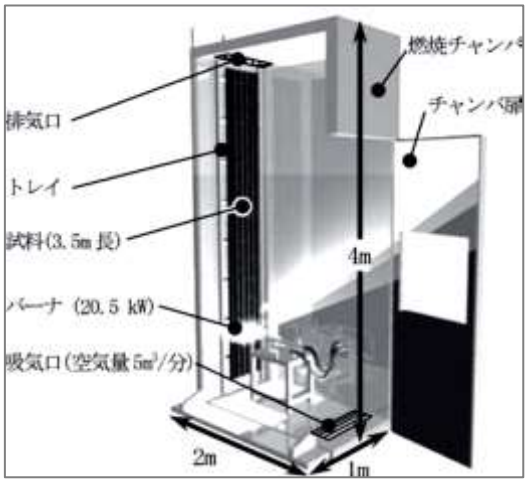


図 31　IEC60332-3 試験装置の概要 [32)]

また EU においては、欧州域内で建造される建築物に使用される各種建築資材に関する共通の規制として、欧州建築資材規制（Construction Products Regulation）が存在しており、ケーブルの燃焼特性をクラス分けするための試験方法としては、EN50399 が策定され

ている。

この EN50399 については、IEC60332-3 と同じ燃焼チャンバを使用しているが（図 31 参照)、垂直トレイ試験で発生した燃焼ガスについて、排気ダクト中で発煙濃度と発熱速度を測定することが可能となっており、ケーブルの耐延焼性、発煙濃度、発熱速度の 3 特性をまとめて評価することができる。したがって、非常に合理的な試験方法の 1 つであり、規格そのものを IEC 化する検討も進められている。

また IEC60332-3 においては、試験時の測定項目が試料の炭化長さだけであるのに対して、EN50399 においては、炎伝播長さ、排気ダクト中の酸素濃度減少量から算出する発熱速度、排気ダクト中を通過する煙による光減衰量から算出する煙生成速度等の測定が要求されている。以下、表 32 へ IEC60332-3 と EN50399 を比較したものを示す。

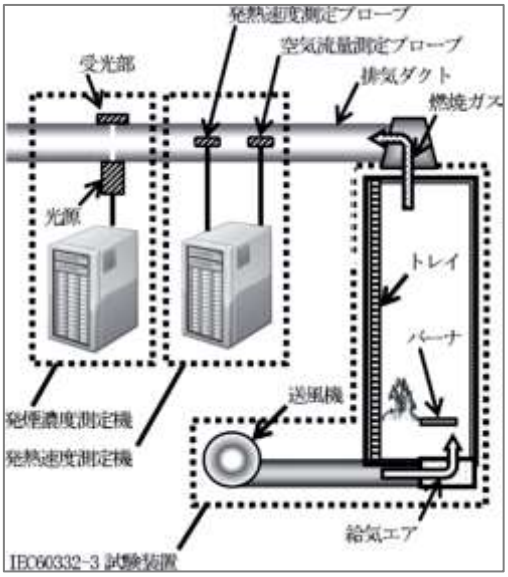


図 32　EN50399 試験装置の概要 [32)]

表 32　欧州系規格における燃焼試験 IEC60332-3 と EN50399 の比較 [32)]

試験規格	IEC60332-3	EN50399
バーナ出力	20.5 kW	20.5 kW または 30 kW
導入空気量	5m³ / min	8m³ / min
試料必要量	試料の可燃物体積から算出	外径および取り付け幅から算出
試験時間	40 min (Cat.A,B) 20 min (Cat.C,D)	20 min
発熱量測定	無	酸素濃度計による発熱量測定
発煙性測定	無	光減衰量測定による発煙性測定
測定項目	シース炭化長	火炎伝播高さ、発熱速度、総発熱量、火災成長速度、煙生成速度、総煙生成量

・ライザー試験（UL1666）

ライザーケーブル試験とは、米国においてビルの垂直シャフト内へ敷設されるケーブルを対象とした試験である。その試験装置については、ビルの床と天井に見立てた 2 つの仕切りで区切られた 3 層構造を有しており（図 33 参照）、各々の仕切りには、上下へ相対する位置に 300 ㎜ × 600 ㎜の貫通部があり、3 階の天井部には試料ケーブル引き留め装置、1 階の床部には出力 155kW（垂直トレイ試験の約 7 倍）の大型ガスバーナが設置されている。

その試験条件については、各仕切りの貫通部へ所定の本数の試料ケーブルを垂直に吊り下げ、下から上へ風速 3.5m/秒で送風した状態でバーナによる着火を行う、といった内容である。なお、その結果については、30 分間燃焼させた後の炎の伝播高さと 3 階床部分で測定した温度で判定され、その判定基準については、炎の伝播高さが 12ft（3.66m）を超えないこと、3 階床部分の温度が 850°F（454.4℃）を超えないこと、となっている。

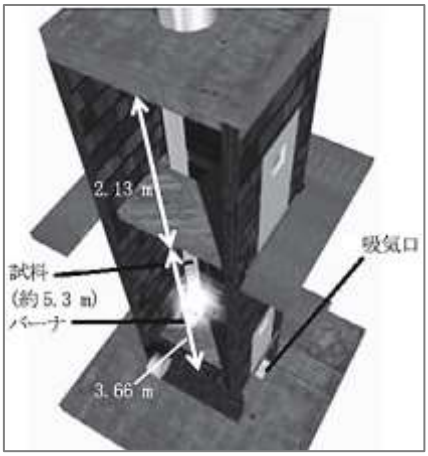


図 33　ライザーケーブル試験装置の概要 [33)]

・スタイナートンネル試験（NFPA262／ASTM E84）

スタイナートンネル試験とは、プレナム空間（建物の天井裏や床下の空間）に敷設されるケーブルを対象とした試験であり、UL が開発した UL910 を前身とするものである。一般にプレナム空間では空調された空気が循環しており、この空間内にある可燃物が着火した際には、空気の流れに沿って延焼し、大規模な火災となる可能性が高い。したがってこの試験方法は、そのような条件下における燃焼性状を模擬するためのものである。

また試験条件については、温度、湿度、室内圧をコントロールした試験室内へ設置した全長約 8m の試験炉内に、長さ 7.4m×幅 0.45m×深さ 0.3m のケーブルトレイを設置し、そのトレイ全長に亘ってケーブル試料を布設した状態で、トレイの一端に設けられた出力 88kW の大型バーナを用いて、バーナ側から排気ダクトへ向けて風速 1.4m/秒で送風しつつ、ケーブルを着火する、という内容である（図 34 参照）。なお、その結果については、20 分間燃焼させた後の炎の燃え広がり長さと煙濃度の最大値と平均値で判定され、その判定基

準については、炎の広がり長さが 5ft（1.52m）を超えないこと、煙濃度が最大値 0.5、平均値 0.15 を超えないこと、となっている。

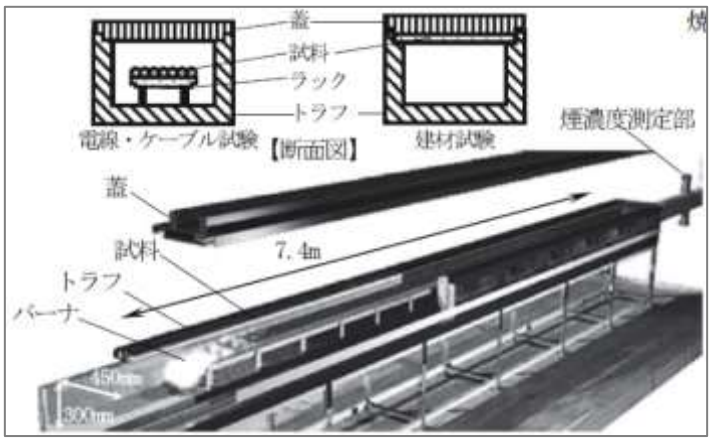


図 34　スタイナートンネル試験装置の概要 [33)]

２－７－２－２　発煙性試験

発煙性の評価は、人員の避難や消火活動に影響する火災リスク評価上の重要項目である。以下、表 33 へ代表的な発煙性評価試験を示す。

表 33　代表的な発煙性評価試験[33)]

試験の種類		適用規格
スモークチャンバー試験	NBS 法	ASTM E662 等
	ISO 法	ISO 5659-2
3m キューブ試験		IEC 61034 等

現在の発煙性評価試験は、燃焼によって発生する煙による光の透過率の減衰量を測定するものが一般的である。その試験方法については、試料の燃焼によって発生した煙を一定容積の試験室内に蓄積した状態で、発煙量を測定する静的方法と、燃焼試験設備の排気ダクト中を一定流速で通過する煙量について、一定間隔で測定する動的方法の 2 つが存在する。

静的方法の場合は比較的簡易に測定できるものの、試験装置壁面への煙の付着、煙性状の経時的変化等の影響を受ける、という欠点が存在する。その一方で動的方法の場合は、ダクト流速の測定系が必要となり、装置の機構がより複雑なものとなるが、大規模な試験に対しても適用可能であり、材料の各燃焼段階における煙の発生性状をリアルタイムに観測することが可能となる。

・スモークチャンバー試験

スモークチャンバー試験とは、発煙性を評価する試験の 1 つである。その試験装置については、幅 914 ㎜×奥行 610 ㎜×高さ 914 ㎜の箱、箱内に設置された出力 25kW/m^{2}と 50kW/m^{2}の電熱ヒーター、試料ホルダ、試料点火用口火、煙濃度測定装置等で構成されており、試料寸法については、約 75 ㎜角×厚さ 25 ㎜以下と規定されている。また試験条件としては、試料の真正面に設置した電熱ヒーターで試料を加熱し、燃焼させ、発生した煙の濃度を光透過率の減衰量として測定し、評価するといった内容である。なお、試験の着火方法については、パイロットバーナを使用して強制的に着火するフレミング法と、パイロットバーナを使用しないノンフレミング法（スパーク等による着火）が存在しており、一般にノンフレミング法よりもフレミング法の方が発煙性は高くなることが知られている。またその試験方式については、NBS 法と ISO 法の 2 つが存在している。

NBS 法とは発煙性評価試験として比較的早期に米国の National Bureau of Standard（NIST の前身）によって開発された方法で、電熱ヒーターと試料ホルダを垂直に配置するのが特徴である。したがって NBS 法の場合は、熱可塑性の試料が試験中に流動し、ホルダから移動するため、その全てが燃焼できず、正確な試験ができないこともある。

一方、ISO 法の場合は、電熱ヒーターと試料ホルダを水平に配置し、前述した NBS 法の

問題点を解消できることが特徴である（図 35 参照）

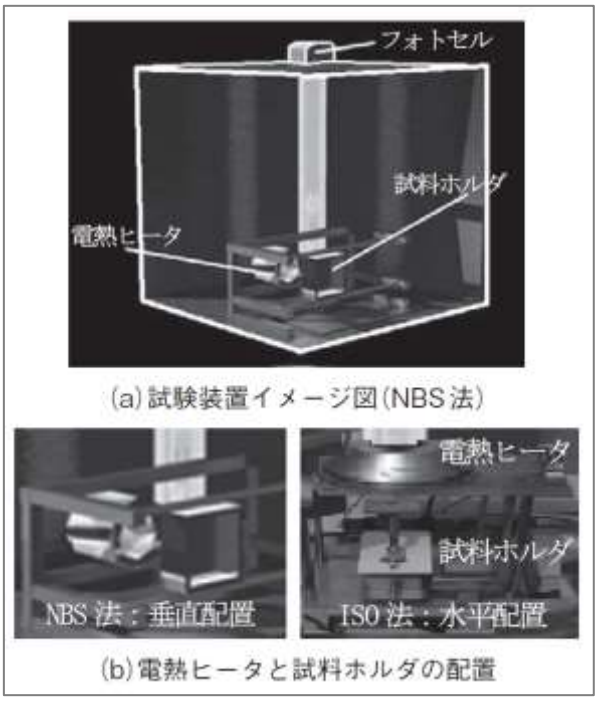


図 35　スモークチャンバー試験装置の概要 [33)]

・3m キューブ試験

3m キューブ試験とは、発煙性を評価する試験の 1 つである。その試験装置については、幅 3m×奥行 3m×高さ 3m の試験室、燃料容器、空気循環用ファン、および煙濃度測定装置等で構成されており、この試験はロンドン地下鉄の火災事故（1981）を契機に開発されたものである。

その試験条件については、アルコール火源を用いて、長さ 1m の試料を燃焼させ、試験室内に封入された煙による光の透過率の減衰量から、試料の発煙量を評価するといった内容である（図 36 参照）。なお、試料の本数については、ケーブル外径によって異なっており、所定の本数を燃焼容器の真上に配置した状態で試験が行われる。試験の名称については、試験室の各辺寸法が 3m であったことから 3m キューブ試験と名付けられることになった。

この他、ケーブル製品の発煙性を評価するものとしては、前述の UL1685、UL910、EN50399 等も存在しているが、これらの試験の場合、試験装置の排気ダクト内を通過する煙による光の減衰量を測定することから、動的な測定方法に分類されることになる。

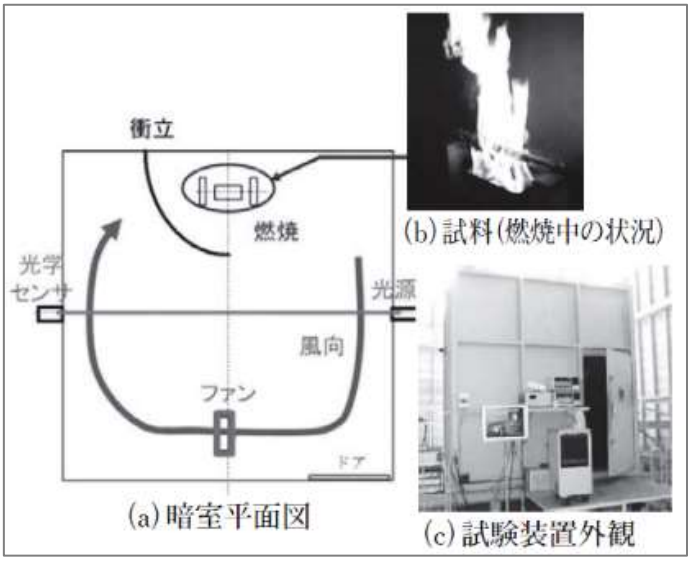


図 36　3m キューブ試験装置の概要 [34)]

２－７－２－３　燃焼時発生ガス評価試験

燃焼時発生ガス試験とは、燃焼時のガス成分を評価するものであり、塩化水素発生量／酸性度評価と、毒性評価の 2 種類に大別されている。

・塩化水素発生量／酸性度評価試験

試験装置については、試料から熱分解ガスを発生させる管状電気炉と、ガス捕集菅などで構成されている。なお、その評価方法については、捕集菅の捕集液へ熱分解ガスを溶け込ませ、その水溶液を規定で定められた方法によって分析し、塩化水素発生量と酸性度を算出するといった内容である。したがって試験の適用としては、高難燃ノンハロゲンケーブルや EM ケーブルの絶縁体とシースの構成材料であることが多い。

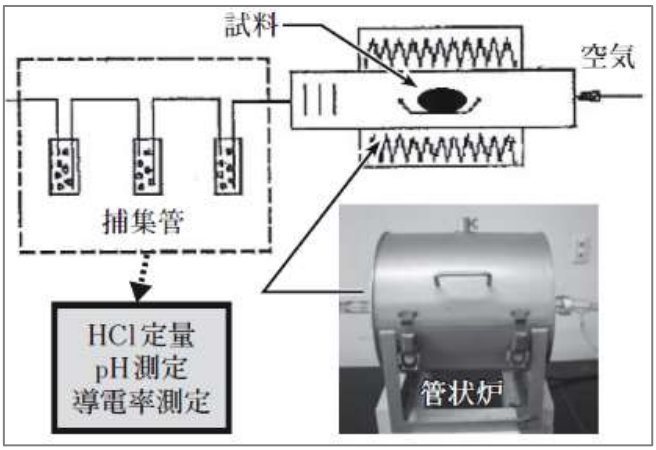


図 37　塩化水素発生量／酸性度試験装置の概要 [34)]

・燃焼時発生ガス毒性評価試験

この試験の評価方法については、試料の燃焼ガスを捕集して、規格で定められた検出対象ガスの重量を測定し、ガス毎に定められた臨界濃度とガスの重量から毒性指数（係数）を算出する、といった形がとられている。この時の臨界濃度とは、ガスの危険度を示す値であり、この値が小さいガスほど、人体への悪影響が増大するというような指標である。次頁の表 34 へは代表的な燃焼時発生ガス毒性評価試験を整理した。

表 34　代表的な燃焼時発生ガス毒性評価試験[34)]

試験規格	分析方法	試験対象物	検出対象ガス
NES713	ガス検知管	プラント機器用各種材料	CO_2, CO, HF, HCl, HBr, HCN, NO_X, SO_2, H_2S, HCHO, C_6H_5OH, NH_3, CH_2CHCN
EN50305 9.2 項	ガス検知管，分光光度計，ND-IR 等	鉄道車両用の電線およびケーブル	CO_2, CO, HCN, NO_X, SO_2
BS6853 Annex B.1	イオンクロマトグラフ，分光光度計，ND-IR 等	鉄道車両用の電線およびケーブル織物、少量使用材料	CO_2, CO, HF, HCl, HBr, HCN, NO_X, SO_2
BS6853 Annex B.2	ガス検知管，イオン濃度計	鉄道車両用の壁材および床材等	CO_2, CO, HF, HCl, HBr, HCN, NO_X, SO_2

①NES713

この試験方法は、英国海軍が定めたものであるものの、現在では発電所等のプラントで使用される各種材料の評価方法として広く適用されている。また試験装置については、$1m^3$の密閉チャンバーとガス検知管等で構成されており、毒性の評価については、試料を着火させてから燃え尽きるまで燃焼させ、密閉チャンバーに溜まった燃焼ガスを検知管で分析し、毒性の評価を行っている（図 38 参照）。表 35 には検知対象ガスの臨界濃度を整理し、毒性係数の計算式については以下へ示すことにした。

表 35　検知対象ガス成分の C_f 臨界濃度（単位：ppm）[34)]

ガス種	C_f 臨界濃度	ガス種	C_f 臨界濃度
CO_2	100,000	SO_2	400
CO	4,000	NO_X	250
H_2S	750	C_6H_5OH	250
NH_3	750	HCN	150
HCHO	500	HBr	150
HCl	500	HF	100
CH_2CHCN	400		

【毒性係数の算出式】

$$毒性係数 = \frac{C_{\theta 1}}{C_{f1}} + \frac{C_{\theta 2}}{C_{f2}} + \frac{C_{\theta 3}}{C_{f3}} + \cdots + \frac{C_{\theta n}}{C_{fn}}$$

C_θ：試料 100g と容積 $1m^3$に換算した濃度の平均値

C_f：表 **35**へ示した値

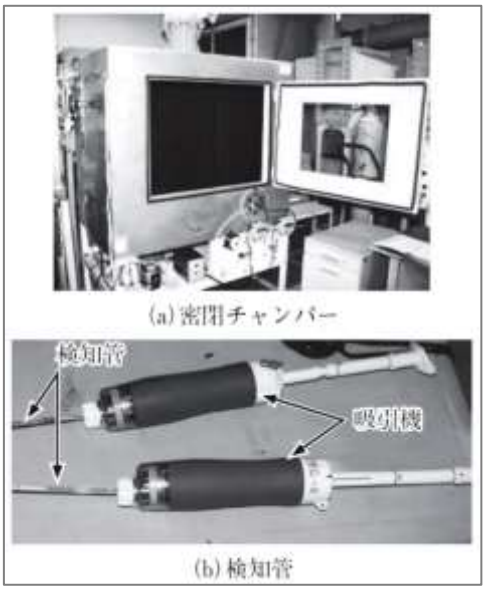


図 38　NES713 試験装置の概要 [34)]

②EN50305 9.2

EN50305 とは、欧州（EU）域内で使用される鉄道車両用電線・ケーブルを対象とした欧州統一規格であり、その中の 9.2 項に規定された試験方法は発生ガスの評価に関するものである。この試験装置については、管状炉、捕集管、ガスパック、検知管等で構成されており、検出するガス種毎にガスの採取方法と分析方法が定められている。したがって、管状炉で発生した試料の燃焼ガスを捕集管とガスパックで採取し、分析するという仕組みであり、この試験については、事前試験と本試験の 2 段階で構成されていることが特徴である。なお、事前試験では、燃焼ガス中に S（硫黄）や N（窒素）が含まれるか否かを確認し、本試験における分析方法の選択を行う（表 36 参照）。

表 36　事前試験（定性分析）結果と本試験の関係 [34)]

定性分析で検出された元素	定量分析対象ガス種（○：測定対象）				
	CO_2	CO	SO_2	NO_x	HCN
無し	○	○	—	—	—
硫黄のみ	○	○	○	—	—
窒素のみ	○	○	—	○	○
硫黄と窒素	○	○	○	○	○
定量分析方法	非分散型赤外分析計		検知管		分光光度計

また本試験には、分光光度計を用いた分析の要否により、試料の燃焼試験回数が変わるという特徴があり、分光光度計を用いた分析が不要の場合は、燃焼ガスについてはガスバック

の採取を目的とした 1 回で済む。

一方、分光光度計を用いた分析が必要な場合では、捕集管での採取も必要となるため、燃焼試験回数は 2 回になる。なお、検出対象ガス種にハロゲン系が含まれない理由は、試験対象となる電線とケーブルには、ノンハロゲンのものを想定しているからである。検知対象ガスの臨界濃度を表 37、毒性指数計算式を以下に示した。

表 37　ガス成分の CCz 値（臨界濃度：mg/m³）[34)]

ガス種	CCz	ガス種	CCz
CO_2	90,000	NO_x	90
CO	1,750	HCN	55
SO_2	260		

【毒性指数の計算式】

$$\text{毒性指数}\quad \mathrm{ITC} = \frac{100}{m} \cdot \sum \frac{M_z}{CC_z}$$

m：試料重量（g）

M_z：発生ガス重量（mg）

CC_z：基準（臨界）濃度（mg/m³）

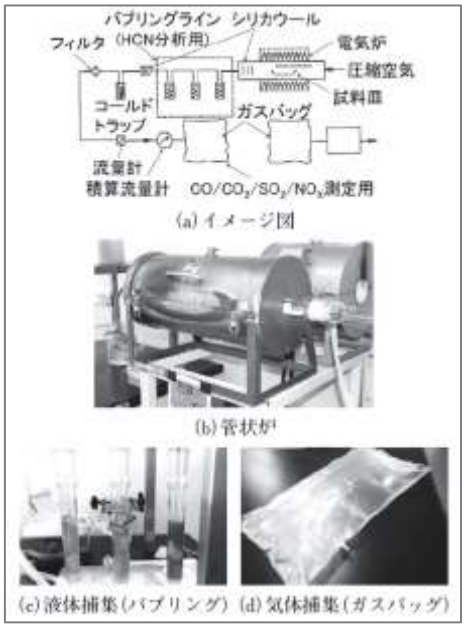


図 39　EN50305 9.2 試験装置の概要[34)]

③BS6853 Annex B.1

BS6853 とは、鉄道用各種部材の火災安全性評価方法を定めた英国規格である。このうち Annex B には燃焼時発生ガス毒性評価試験の方法が 2 種類定められており、Annex B.1 は電線・ケーブル、織物、少量使用材料、Annex B.2 は壁材、床材等を対象としている。なお、どちらの試験についても検出対象ガスは同じであり、ガス発生量の単位が異なるものの、臨界濃度（基準値 fX）は同じ値を使用しており、毒性指数（総量指数 R）の計算式も同様である。Annex B.1 と Annex B.2 については、検出するガス種毎にガスの採取方法と分析方法が定められている点は同じであるが、その分析方法についてはそれぞれ大きく異なっている。

Annex B.1 の試験では、管状炉、捕集管、ガスバック等で構成された試験装置を使用する。その試験内容としては、定められた方法により、管状炉で発生した試料の燃焼ガスを捕集管とガスパックで採取を行い、ガスの分析方法については 4 種類が規定されている。したがって各々の分析のためには、それぞれ燃焼ガスを採取する必要があり、1 つの試料を試験するのに 4 回、更に規格においては n＝3 の試験が要求されているため、合計 12 回も試料の燃焼試験を行なわなければならない。検知対象ガスの臨界濃度を**表 38**、毒性指数計算式を以下に示す。

④BS6853 Annex B.2

一方、Annex B.2 の場合は、発煙性評価試験で述べた ISO5659-2 のスモークチャンバー、イオン濃度計、検知管等で構成される試験装置を使用する。この試験では、燃焼ガス採取のタイミングを決めるために ISO5659-2 の発煙性試験を 1 回行い、その後、改めて試料を燃やして燃焼ガスの採取を行う。なお、ガスの分析方法については 2 種類が規定されているが、各々の分析のための燃焼ガスはスモークチャンバーから連続で採取できるため、試料の燃焼回数は 1 回でよい。したがって、規格では n＝3 の試験が要求されているため、事前の発煙性試験を含め試料燃焼を 4 回行うことになる。検知対象ガスの臨界濃度を**表 38**、毒性指数計算式を以下に示す。

【毒性指数の計算式】

$$\text{毒性指数}\quad \mathrm{R} = \sum \frac{C_x}{f_x}$$

C_x：ガス発生量（Annex B. 1 ⇒ mg/g、Annex B. 2 ⇒ g/m^2）

f_x：表 6 に示す値

表 38　検知対象ガスの臨界濃度（基準値 f_x※）[34)]

ガス種	基準値 f_x	ガス種	基準値 f_x
CO_2	14,000	HBr	20
CO	280	HCN	11
HF	4.9	NO_2	7.6
HCl	15	SO_2	53

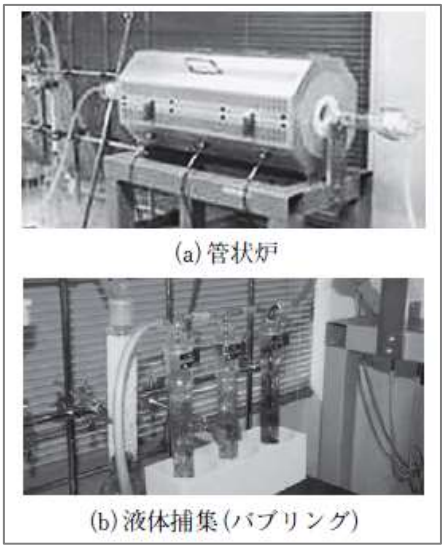


図 40　BS6853 Annex B.1 試験装置の概要 [34)]

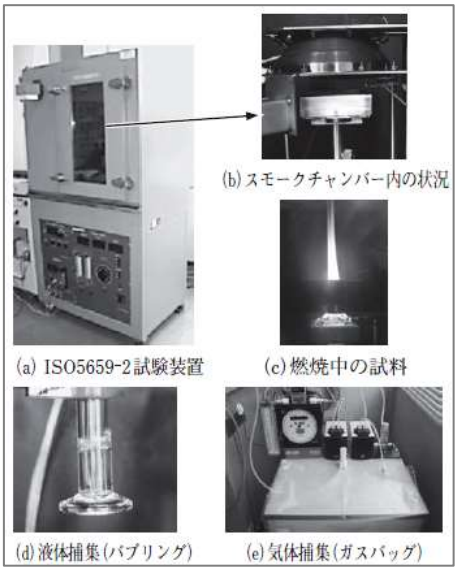


図 41　BS6853 Annex B.2 試験装置の概要 [34)]

２－７－２－４　発熱性試験

発熱性評価試験は、試料が燃焼した時の火炎等による熱の発生状況を評価するものである。試料の発熱量測定には、燃焼ガスに含まれる酸素濃度から発熱量を算出する、酸素消費法と呼ばれる手法が適用されている。酸素消費法とは、燃焼時の発熱量は材料や組成によらず、消費された酸素量に比例するという原理に基づく分析手法で、この原理を用いた試験装置としては、コーンカロリーメータ試験装置が一般的である。このコーンカロリーメータ試験については、燃焼過程における様々なデータがリアルタイムで収集可能であり、日本の建築基準法による建築資材の防火材料の評価試験にも適用されている。その他、電線およびケーブルだけでなく、耐火パネル、複合部材、不燃木材等の材料の評価も実施されている。

図 42　コーンカロリーメータ試験装置の概要 [34)]

２－７－２－５　酸素指数試験

酸素指数評価試験とは、材料自体の燃えにくさを評価するものであり、円筒中に酸素と窒素の混合ガスを送入しながら、短冊状の試料上部に着火させ、試料が 3 分間または試料上端から 50mm 以上燃焼する時の最低の酸素濃度を測定する試験である。空気中の酸素含有率が約 21%であることから、例えば酸素指数が 25 を上回る材料は、空気中で燃え続けられない性質を持ち、火災時においてはその燃焼が継続しにくい材料である、という評価がなされる。

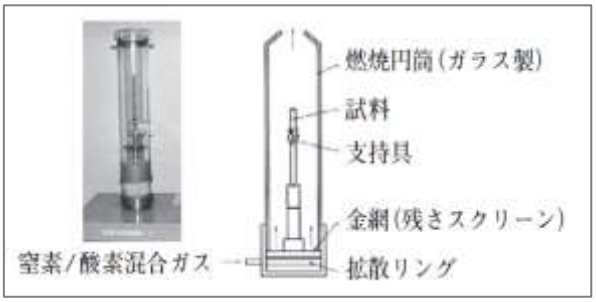


図 43　酸素指数評価試験装置の概要 [34)]

２－７－２－６　耐火耐熱性能試験

● 消防用電線の耐火耐熱性能試験

ここで述べる耐火耐熱性能とは、いわゆる消防用電線を対象としたもので、火災によって絶縁被覆が燃焼した状況下での絶縁性能を示すものである。表 39 には主な耐火耐熱性能試験を示した。

表 39　主な耐火耐熱性能試験 [35)]

種別	試験対象品	適用規格
消防用電線※	耐火電線	平成 9 年消防庁告示第 10 号
	耐熱電線	平成 9 年消防庁告示第 11 号
	耐熱同軸	JCS5501
	耐熱光ケーブル	JCS5502
その他	船舶用電線等	IEC60331 シリーズ

※消防法施工規則に規定するもの

耐火電線と耐熱電線については、平成 9 年消防庁告示に技術基準が定められている。日本においては、国内唯一の耐火耐熱電線等の登録認定機関として、電線総合技術センター（JECTEC）が存在しており、消防庁告示による耐火耐熱電線の適合性検査を行い、認定証書の発行を行っている。それに加えて、JECTEC としては第三者認証機関の機能も有しており、耐熱同軸ケーブル等についても同様にして、(一社)日本電線工業会規格（JCS）への適合性検査を行い、評定証書の発行を行っている。

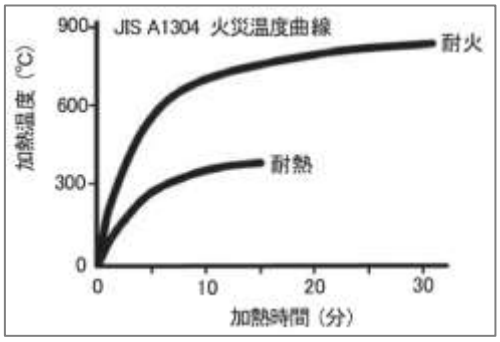


図 44　耐火および耐熱電線の加熱標準曲線 [35)]

消防用電線の耐火耐熱性能試験とは、JIS A1304 に規定の標準温度曲線（図 44 参照）に沿って加熱し、その加熱前後を通してケーブルの絶縁性能を評価する試験であり、試験対象により多少の違いはあるものの、この加熱条件については共通である。したがって、その代表例としては、小型加熱炉による低圧耐火電線の試験を紹介する。

この試験では試料の大きさに応じて、小型耐火炉と大型耐火炉（図 46 参照）の異なる耐火炉で試験を実施する。またその試験中には、所定の位置に設置した熱電対で試料付近と火

炎の温度を測定し、加熱温度が標準曲線に沿うように、温度を自動制御する必要がある。その加熱形態については、型式の区分により露出試験と電線管試験の 2 種類があり、どちらも長さ約 1.3m の試料を約 300mm 角×10mm 厚のケイ酸カルシウム板等の板（以下、耐火板と記す）に取り付け、加熱炉で加熱しながら試料に通電する、といった条件である。試料の加熱前後の電気特性については表 40 へ示した。

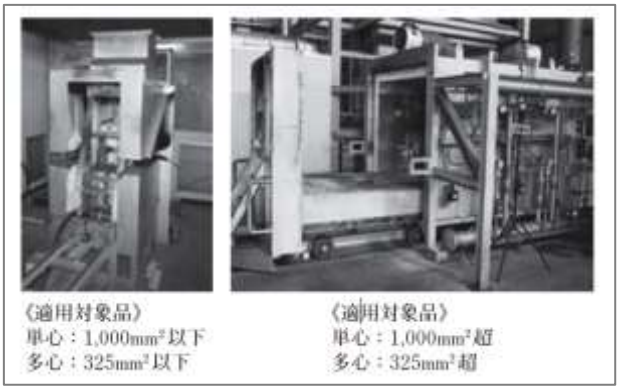


図 45　耐火炉の概要（左：小型，右：大型）[35)]

表 40　低圧耐火電線の加熱前後の電気特性 [35)]

試験状況	絶縁抵抗値（MΩ）	絶縁耐力（耐電圧）	
		交流電圧（V）	時間（分）
加熱前	50	1,500	1
加熱中	—	600	30
加熱終了直前	0.1	—	—
加熱終了後	—	1,500	1

露出試験の場合は、表 41 に示す条件で試料を屈曲した後で耐火板に取り付け、試料自重の 2 倍の荷重を試料に取付けた状態（図 46(a)参照）で加熱を行い、加熱中に炉内壁から 150mm 以上燃焼してはならない、と規定されている。この場合は屈曲によるダメージに加え、荷重によるストレスが加わるため、非常に厳しい試験条件であると考えられている。

表 41　低圧耐火電線の露出試験における屈曲条件 [35)]

仕上外径 D	曲げ半径（D の倍数）	曲げ回数
30mm 以下	単心：6D　多心：4D	4 回
30mm 超え	単心：8D　多心：6D	

一方、電線管試験の場合では、試料の仕上外径に応じた口径の電線管に試料を挿入し、端部にロックウールを充填したものを耐火板に取付けた状態（図 46(b)参照）で加熱する。なお、加熱中に熱分解した試料の構成材料には、絶縁性能を低下させる作用があり、この試験

はサイズによって異なるものの、露出試験よりも厳しくなる傾向がある。

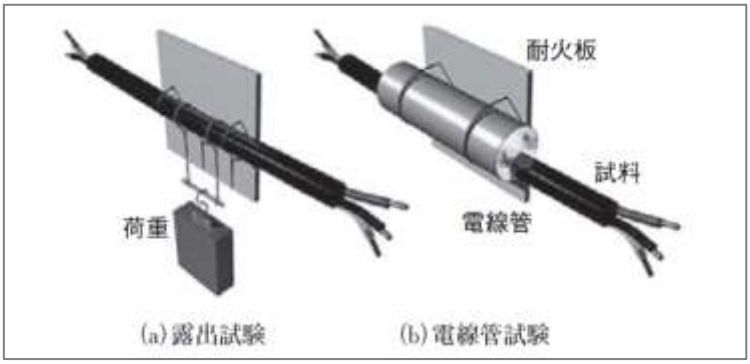


図 46　試料の取り付け状況（左：露出試験，右：電線管試験）[35)]

● その他の耐火耐熱性能試験

前述の耐火耐熱性能試験以外に、IEC60331 シリーズの耐火耐熱性能試験（表 42、図 47 参照）が存在している。なお、これらの試験方法については、試験中に試料へ振動を与えるというユニークな特徴があり、主に船舶用の耐火電線に適用されている。

表 42　IEC60331 シリーズの試験条件 [35)]

項目	試験条件
加熱温度×時間	830℃×20 分以上
加熱中の測定	絶縁耐力と絶縁抵抗
その他	5 分間隔で試料取付ラダーを打撃

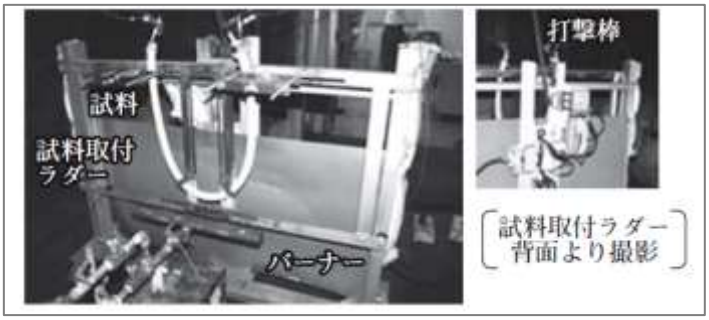


図 47　IEC60331 シリーズの試験装置の概要 [35)]

２－８　まとめ

本章では、電線とケーブルの基本事項を把握することを目的として、それらの基本事項について、以下の内容を整理した。

- 電線とケーブルの安全規制に関して、電気事業法や電気用品安全法など、製造販売、工事、維持運用の 3 段階ごとに各法規制の適用範囲を整理した。その結果、日本における電線とケーブルの規制体系については、電気工作物の種類により、二重規制を避ける工夫が図られていることを把握した。
- 電線とケーブルの違いについては、関係法令上で明確な区別は存在しないが、関係省庁等の解釈に基づき、両者の違いを明確なものとした。その結果、電線とは「電気導体の上を絶縁物で被覆したもの」であり、ケーブルとは「電気導体の上を絶縁物で被覆し、かつ、その上を保護被覆したもの」であること、すなわち構成要素としての外装（シース）の有無で両者の違いが説明できることを把握した。
- ケーブルの基本構造については、その代表として高圧 CV ケーブルを選別し、各構成要素の有する機能に関しては、文献を用いて詳細な調査を実施した。その結果、高圧 CV ケーブルは、①導体、②内部半導電層、③絶縁体、④外部半導電層、⑤金属遮へい層、⑥介在（詰物）、⑦押え（テープ）、⑧外装（シース）、の 8 つの要素から構成されており、火災時における主な可燃物としては、③絶縁体、⑥介在（詰物）、⑧外装（シース）、の 3 つの構成要素を重要視すべきであることを把握した。
- 電線とケーブルに関する規格については、国内外で関連規格を発行している代表的な規格組織の整理を行った。その結果、国内における主な関連規格は、日本工業規格（JIS）、日本電線工業会規格（JCS）、電力用規格の 3 つへ大別できることを把握し、国外のものについては、国際標準化機構（ISO）規格、国際電気標準会議（IEC）規格など複数が存在することを把握した。
- 一般的な電線とケーブルに課される性能評価項目として、JIS C 3005（ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法）の規格内容を調査した。その結果、性能の評価項目としては 30 項目が存在し、そのうちの 1 つに「難燃」の性能が課されていることを把握した。
- ケーブルの着火と燃焼特性に関する評価方法において、火災安全性能として課される評価項目ごとの燃焼試験について、文献調査を実施した。その結果、火災安全性能を評価する項目としては、①耐延焼性、②発煙性、③発生ガスの毒性と腐食性、④発熱性、⑤耐火性と耐熱性、の 5 つが存在していることを把握し、それぞれの試験方法について、その概要を整理した。

参考文献

1）総務省行政管理局：電子政府の総合窓口 e-Gov（イーガブ），http://www.e-gov.go.jp/

2）経済産業省：電気事業法，平成 27 年 06 月 24 日（最終改正），電子政府の総合窓口 e-Gov（イーガブ），
http://law.e-gov.go.jp/cgi-bin/idxselect.cgi?IDX_OPT=1&H_NAME=%93%64%8b%43%8e%96%8b%c6%96%40&H_NAME_YOMI=%82%a0&H_NO_GENGO=H&H_NO_YEAR=&H_NO_TYPE=2&H_NO_NO=&H_FILE_NAME=S39HO170&H_RYAKU=1&H_CTG=1&H_YOMI_GUN=1&H_CTG_GUN=1

3）経済産業省：電気用品安全法，平成 26 年 06 月 18 日（最終改正），電子政府の総合窓口 e-Gov（イーガブ），
http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S36/S36HO234.html

4）経済産業省：電気設備に関する技術基準を定める省令，平成 24 年 09 月 14 日（最終改正），電子政府の総合窓口 e-Gov（イーガブ），
http://law.e-gov.go.jp/cgi-bin/idxselect.cgi?IDX_OPT=1&H_NAME=%93%64%8b%43%90%dd%94%f5%82%c9%8a%d6%82%b7%82%e9%8b%5a%8f%70%8a%ee%8f%80%82%f0%92%e8%82%df%82%e9%8f%c8%97%df&H_NAME_YOMI=%82%a0&H_NO_GENGO=H&H_NO_YEAR=&H_NO_TYPE=2&H_NO_NO=&H_FILE_NAME=H09F03801000052&H_RYAKU=1&H_CTG=1&H_YOMI_GUN=1&H_CTG_GUN=1

5）経済産業省：電気用品の技術上の基準を定める省令，平成 25 年 07 月 01 日（最終改正），商務流通保安グループ　製品安全課，電子政府の総合窓口 e-Gov（イーガブ），
http://law.e-gov.go.jp/cgi-bin/idxselect.cgi?IDX_OPT=1&H_NAME=%93%64%8b%43%97%70%95%69&H_NAME_YOMI=%82%a0&H_NO_GENGO=H&H_NO_YEAR=&H_NO_TYPE=2&H_NO_NO=&H_FILE_NAME=H25F15001000034&H_RYAKU=1&H_CTG=1&H_YOMI_GUN=1&H_CTG_GUN=1

6）経済産業省：電気設備に関する技術基準を定める省令の解説，平成 24 年 09 月（最終改正），商務流通保安グループ電力安全課，
http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/files/dengikaisetsu.pdf

7）経済産業省：電気設備の技術基準の解釈，平成 27 年 12 月 03 日（最終改正），商務流通グループ電力安全課，
http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/files/260718-24.pdf

8）経済産業省：電気設備の技術基準の解釈の解説，平成 27 年 12 月 03 日（最終改正），

商務流通グループ電力安全課,
http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/files/260718-25.pdf
9）経済産業省：電気工作物に係る安全規制について，平成 25 年 01 月 11 日,
http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g21024b02j.pdf
10）経済産業省：原子力発電工作物に係る電気設備に関する技術基準を定める省令，平成 24 年 09 月 14 日（最終改正),
http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H24/H24F15001000070.html
11）経済産業省：電気工作物の区分，平成 28 年 01 月 01 日時点,
http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/detail/setsubi_hoan.html
12）NRC：“Fire Dynamics Tools (FDTs) Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program”, NUREG-1805, December 2004, p. A-3,
http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0432/ML043290075.pdf
13）㈳日本電力ケーブル接続技術協会安全対策委員会：電力ケーブル接続用品の保守・点検指針，2000 年 03 月，JCAA 技術報告（第 6 号),
http://www.jpcaa.or.jp/pdf/gijyutu/report6.pdf
14）紀谷文樹ほか：建築設備ハンドブック，2010 年 09 月 20 日初版第 1 刷，pp.865-869,
㈱朝倉書店
15）早川義晴：第一種電気工事士筆記試験合格ガイド，翔泳社，第 2 版
16）関東電気保安協会：高圧ケーブルの水トリー現象，電気の豆知識,
https://www.kdh.or.jp/safe/document/knowledge/hp_equipment05.html
17）富士電機：ケーブルの絶縁破壊事故の大半を占める「水トリー劣化」を診断で事前に察知，受変電設備の予防保全,
http://www.fujielectric.co.jp/products/service/service_menu/yobouhozen/juhenden/49.html
18）東日京三電線株式会社：用語集,
http://www.tonichi-kyosan.co.jp/technical/glossary/index.html
19）一般社団法人日本電線工業会：電線とは，http://www.jcma2.jp/densen.html
20）昭和電線ケーブルシステム株式会社：産業用電線・ケーブル,
http://www.swcc.co.jp/cs/products/industrial_cable/p_plastic/p_plastic.html
21）経済産業省：電線・ケーブル製造産業の現状と課題,
http://www.meti.go.jp/policy/nonferrous_metal/strategy/cable02.pdf
22）日本工業標準調査会：工業標準化制度の概要，2005 年，日本工業標準調査会 HP,
http://www.jisc.go.jp/std/outline.html

23）カワイ電線株式会社：日本電線工業会規格（JCS 規格），2000 年，カワイ電線株式会社 HP，http://www.kawai-cable.co.jp/seihin/jcs.html
24）電線館.com：電線の規格，フジクラ正規代理店 HP，http://densenkan.com/know/densen9.html
25）防衛省技術本部：防衛省規格（NDS）について，2015 年 07 月 07 日現在，防衛省技術本部 HP，http://www.mod.go.jp/trdi/data/nds.html
26）日本貿易振興機構：ANSI、ASTM International、UL、NEMA、NFPA 等規格関連機関の関係，2012 年 03 月，日本貿易振興機構 HP，https://www.jetro.go.jp/world/qa/04T-120301.html
27）JIS C 3005：ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法，[Test methods for rubber or plastic insulated wires and cables]，2014 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3005-2014-01.html
28）（一社）電線総合技術センター：JECTEC NEWS 68 号，2013 年 03 月，http://www.jectec.or.jp/jectecnews/data/68.pdf
29）JIS A 1304：建築構造部分の耐火試験方法，[Method of fire resistance test for structural parts of buildings]，1994 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/a1/A1304-2011-01.html
30）（一社）電線総合技術センター：JECTEC NEWS 69 号，2013 年 07 月，http://www.jectec.or.jp/jectecnews/data/69.pdf
31）芦田桂子ほか：環境配慮型電線・ケーブル「エコセーフ」の開発，平成 11 年 06 月，三菱電線工業時報第 95 号，三菱電線工業株式会社技術本部中央研究所材料研究部，http://www.mitsubishi-cable.co.jp/jihou/pdf/95/01.pdf
32）（一社）電線総合技術センター：JECTEC NEWS 70 号，2013 年 11 月，http://www.jectec.or.jp/jectecnews/data/70.pdf
33）（一社）電線総合技術センター：JECTEC NEWS 71 号，2014 年 03 月，http://www.jectec.or.jp/jectecnews/data/71.pdf
34）（一社）電線総合技術センター：JECTEC NEWS 73 号，2014 年 11 月，http://www.jectec.or.jp/jectecnews/data/73.pdf
35）（一社）電線総合技術センター：JECTEC NEWS 74 号，2015 年 03 月，http://www.jectec.or.jp/jectecnews/data/74.pdf
36）JIS C 3307：600V ビニル絶縁電線（IV），[600 V Polyvinyl chloride insulated wires]，2000 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3307-2000-02.html
37）JIS C 3317：600V 二種ビニル絶縁電線（HIV），[600V Grade heat-resistant polyvinyl chloride insulated wires]，2000 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3317-2000-02.html
38）JIS C 3323：600V けい素ゴム絶縁電線，[600V Silicone rubber insulated wires]，

2012 edition, 日本工業標準調査会(JISC), http://kikakurui.com/c3/C3323-2012-01.html
39) JIS C 3316：電気機器用ビニル絶縁電線，［Polyvinyl chloride insulated wires for electrical apparatus］，2000 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3316-2008-01.html
40) JIS C 3341：引込用ビニル絶縁電線（DV），［Polyvinyl chloride insulated drop service wires］，2000 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3341-2000-01.html
41) JIS C 3340：屋外用ビニル絶縁電線（OW），［Outdoor weatherproof polyvinyl chloride insulated wires］，2000 edition，日本工業標準調査会（JISC），
http://kikakurui.com/c3/C3340-2000-01.html
42) C-107：屋外用架橋ポリエチレン絶縁電線（OC），［Outdoor cross-linked polyethylene insulated wires］，1986 年 11 月，㈳日本電気協会 HP，http://mail.denki.or.jp/pub/kikaku.htm
43) JIS C 3609：高圧引下用絶縁電線，［High-voltage drop wires for pole transformer］，2000 edition, 日本工業標準調査会(JISC), http://kikakurui.com/c3/C3609-2000-01.html
44) JIS C 3611：高圧機器内配線用電線，［Insulated wires for cubicle type unit substation for 6.6 kV receiving］，1991 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3611-1991-01.html
45) JIS C 3342：600V ビニル絶縁ビニルシースケーブル（VV），［600 V Polyvinyl chloride insulated and sheathed cables］，2012 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3342-2012-01.html
46) JIS C 3605：600V ポリエチレンケーブル，［600 V Polyethylene insulated cables］，2002 edition, 日本工業標準調査会(JISC), http://kikakurui.com/c3/C3605-2002-01.html
47) JIS C 3606：高圧架橋ポリエチレンケーブル，［High-voltage cross-linked polyethylene insulated cables］，2003 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3606-2003-01.html
48) 電力用規格 A-216：22・33kV CV ケーブル，1998 年 07 月，㈳日本電気協会 HP，http://www.denki.or.jp/pub/cat/standard/a0217.html
49) JIS C 3401：制御用ケーブル，［Control cables］，2002 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3401-2002-01.html
50) JCS 4258：制御用ケーブル（遮へい付），2003 年 09 月，（一社）日本電線工業会 HP http://www.jcma2.jp/jcs.html
51) 日本電線工業株式会社：ケーブルのノイズ対策，2015 年 07 月 21 日時点，技術情報，日本電線工業会株式会社 HP，http://www.nihondensen.co.jp/tech/pdf/noise.pdf
52) Yahoo 知恵袋：ケーブルの外形と断面積教えてください，2011 年 11 月 18 日，http://detail.chiebukuro.yahoo.co.jp/qa/question_detail/q1475685434

53）電材ネット：遮蔽層の種類，2015 年 07 月 21 日時点，電線・ケーブルン基礎知識，電材ネット HP，http://www.denzai-net.jp/technical/den_technical_d-05.html
54）JCS 9072：着色識別星形ポリエチレン絶縁ポリエチレンシースケーブル，2011 年 12 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
55）JCS 9070：通信用構内ケーブル，2014 年 03 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
56）JCS 9071：屋内用ボタン電話ケーブル，2014 年 03 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
57）JCS 9068：屋内用通信電線，2014 年 03 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
58）JCS 5224：市内対ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル，2014 年 03 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
59）JCS 5402：着色識別ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル，2014 年 03 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
60）e-Words：LAN［Local Area Network］，2015 年 07 月 21 日時点，IT 用語辞典 e-Words HP，http://e-words.jp/w/LAN.html
61）JCS 5504：電子ボタン電話用ケーブル，2011 年 12 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
62）TIA/EIA/568-B.2（Revision of TIA/EIA-568-A）：
Commercial Building Telecommunications Cabling Standard，April 23. 2001，http://www.csd.uoc.gr/~hy435/material/TIA-EIA-568-B.2.pdf
63）JIS C 3502：テレビジョン受信用同軸ケーブル，［Coaxial cables for television receivers］，2007 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3502-2007-01.html
64）JIS C 3501：高周波同軸ケーブル（ポリエチレン絶縁編組形），［Radio-frequency coaxial cables］，1993 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3501-2009-01.html
65）JCS 4506：低圧耐火ケーブル，2013 年 04 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
66）JCS 3501：小勢力回路用耐熱電線，2013 年 04 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
67）JCS 4396：警報用ポリエチレン絶縁ケーブル，2014 年 07 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
68）JCS 4376：600V 分岐付ケーブル，2015 年 06 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
69）JCS 5424：通信分岐付ケーブル，2006 年 03 月，（一社）日本電線工業会 HP，

http://www.jcma2.jp/jcs.html
70) JCS 4398 : 屋内配線用ユニットケーブル，2015 年 06 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
71）JIS C 3312 : 600 V ビニル絶縁ビニルキャブタイヤケーブル，［600 V Grade polyvinyl chloride insulated and sheathed portable power cables］，2000 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3312-2000-01.html
72) JIS C 3327 : 600V ゴムキャブタイヤケーブル，［600V Rubber insulated flexible cables］，2000 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3327-2000-02.html
73) JIS C 3306 : ビニルコード，［Polyvinyl chloride insulated flexible cords］，2000 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3306-2000-02.html
74）JIS C 3301 : ゴムコード，［Rubber insulated flexible cords］，2000 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3301-2000-02.html
75) JIS C 3612 : 600V 耐熱性ポリエチレン絶縁電線，［600V Flame retardant polyethylene insulated wires］，2002 edition，日本工業標準調査会（JISC），http://kikakurui.com/c3/C3612-2002-01.html
76）JCS 9075 : 耐燃性ポリエチレンシース通信用構内ケーブル，2011 年 10 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
77）JCS 9074 : 耐燃性ポリエチレン被覆屋内用通信電線，2011 年 10 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
78) JCS 5421 : 着色識別ポリエチレン絶縁耐燃性ポリエチレンシースケーブル，2011 年 10 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
79) JCS 5423 : 衛星放送テレビジョン受信用耐燃性ポリエチレンシース同軸ケーブル，2012 年 03 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
80）JCS 4427 : 600VＥＭ分岐付ケーブル，2003 年 06 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
81）JCS 4425 : 屋内配線用ＥＭユニットケーブル，2015 年 06 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
82) JCS 4509 : 耐燃性ポリオレフィンコード，2007 年 04 月，（一社）日本電線工業会 HP，http://www.jcma2.jp/jcs.html
83）全日本電線関連産業労働組合連合会 : 全電線政策レポート（第 3 号），2014 年 07 月 24 日，http://www.densen.or.jp/katudo/link-files/2014seisaku-report.pdf#search='%E7%B5%8C%E6%B8%88%E7%94%A3%E6%A5%AD%E7%9C%81+EM%E9%9B%BB%E7%B7%9A'
84）（一社）日本電線工業会 : EM 電線・ケーブル，環境技術委員会，http://www.jcma2.jp/eco/em.html

第三章　電線およびケーブルの寄与する火災に関する整理

本章の目的は、電線とケーブルが寄与する火災（以下、ケーブル火災）の代表的な火災事例、発生傾向、発生メカニズムなどについて、それぞれの大枠を把握することである。したがって、ここでは火災統計や既往文献等を用いた調査結果を記述する。

３－１　代表的な火災事例

ここではケーブル火災事故のうち、NYC アベニュー電話局ケーブル火災（1975）、ブラウンズフェリー原子力発電所ケーブル火災（1975）、女川原子力発電所電気盤火災（2011）の 3 つを代表事例として選別し、それぞれの概要について紹介する。 s

３－１－１　NYC アベニュー電話局のケーブル火災事故 [1)]

図 48　New York Telephone Exchange Fire[2)]

・<u>火災事故の概要 [1)]</u>

12 の地域へ電話サービスを提供していたニューヨーク市電話局で、第五警戒レベルの火災が発生した。その火災は地階のマンホールで出火した後、垂直ケーブルトレイに沿って 1 階と 2 階へ延焼し、1 階と 2 階のほとんどの電話交換機器を破壊した。なお、最終的には 12 階建てであった建物全域へ延焼し、176 名の消防士（一般人も数名含まれる）がケーブル絶縁物の PVC から発生した煙により負傷した事故となった。またこの事故では、少なくとも推定 3000～6000 万ドルの物的被害が生じており、火災の原因はケーブルの短絡である、と結論づけられている。

・火災事故の背景[1)]

この 12 階建ての建物は、約 30m×約 84m（100 フィート×280 フィート）から成る耐火構造（外壁：ブロック，床スラブ：RC 造，柱：RC 造「1 階～4 階」、鉄骨造「5 階以上」）で、そのマンホールの大きさは約 6m×約 84m（20 フィート×280 フィート）であり、主要配線盤（Main Distribution Frame）も併設されていた（図 49 参照）。なお、そのマンホールと 1 階の部分は、ダストパーテーション、金属およびガラス等で分離されていた。また地階にあるマンホールの周辺には、電話会社の様々な電気機器が設置されており、1 階と 2 階の部分には、主として自動電話交換機器が設置されていた。そのほか 3 階には事務所、それ以上の上階には、電話交換機器と事務所が混在していた。事故当時の電話局では、12 地域の 170,000 回線を提供していた。

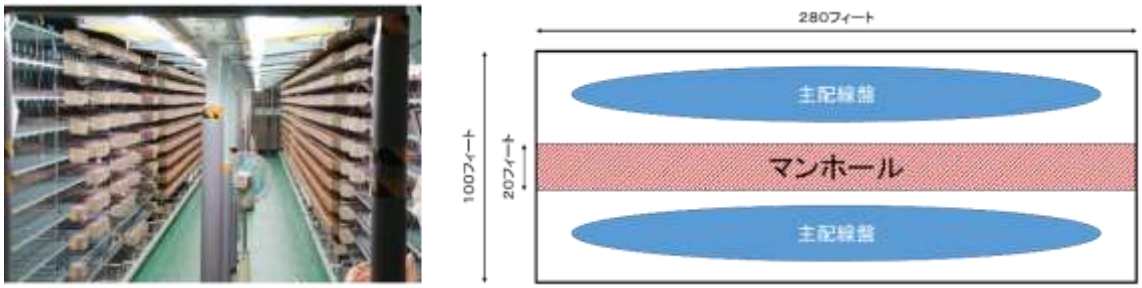


図 49　主要配線盤付近のイメージ（左）[21)]，ニューヨーク市電話局のスケール（右）

・火災事故の経過[1)]

1975 年 02 月 27 日（木）午前 12 時 25 分、ニューヨーク市電話局にある（地下ケーブルの接続および修理などを行うための）マンホール（Cable vault）で火災が発生し、その火災はマンホール内にいた従業員によって発見された。また時を同じくして、別のマンホールからも煙が漏れていたことが確認されている。なお、消防署への通報は迅速に行われたが、消防隊が現場へ到着する頃には、地階から 1 階部分へ火災が延焼していた。その後、27 日の夜遅く（出火から 16 時間後）まで鎮圧されず、最終的には第五警戒レベルと特別警報が発せられる火災事故となった。またこの火災では、様々な種類の垂直ケーブルトレイを延焼経路として、フロアからフロアへ火災が延焼した。主なケーブルの経路は、外壁の内部へ配置されており、その他は基本的に床スラブにある貫通孔を通して、ケーブルで延長されていた。これらの貫通孔の一部（三階と四階）には、難燃性の詰め物で防護措置がなされていた（貫通孔の上下に金属プレートで蓋をし、その内部へ石綿で作られた難燃性のバッグを詰める）が、火災の延焼を防ぐ上では、あまり効果がなかった（上階への熱の伝達を妨げる意味では有効であった）。また建物の一部には、自動消火設備（スプリンクラー）が設置されていたが、火災現場には設置されておらず、火災検知設備としては、イオン式の火災感知器と熱検知線が設置されており、それらは正常に作動した（検知時間の遅れ程度は不明）が、建物内のみを対象としたもの（消防署へ自動通報する火災報知設備ではなかった）であった。

・火災事故の分析[1)]

この火災は電話交換事業における火災防護対策について、根本的な再評価が必要であることを徹底的に社会へ対して指摘したものである。またこの火災の延焼と PVC により発生した煙による被害は、ニューヨーク消防とその関係者へ広範な課題を創り出すことになった。電話サービスに依存した今日の世界では、電話サービスの損失は深刻な影響を及ぼし得るものである。

３－１－２　ブラウンズフェリー原子力発電所のケーブル火災事故[3),4),5),6),7),8)]

図 50　The Browns Ferry Nuclear Plant Fire[3)]

・**火災事故の概要**[4),5)]

1975 年 3 月 22 日、ブラウンズフェリー原子力発電所の原子炉 1 号機で、技術補助員が補助建屋のケーブル処理室にて、原子炉建屋との貫通部の漏洩検査を行っていた際、検査に用いていたローソクの炎が貫通部のシール材（現場施工の発泡ポリウレタン）へ引火し、ケーブル処理室で火災となった後、空気の流れによってその火災は原子炉建屋内へと広がった。この事故では、火災の発生から消火までに 8 時間を要し、約 620 本の安全制御関連のケーブルを含め、約 1600 本以上のケーブルが利用不能になった[4),5)]。なお、その焼損範囲は図 51 へ示した通りである。

・**火災事故の背景**[5)]

ブラウンズフェリー原子力発電所は、1966 年に建設許諾（Construction Permit）を受けており、1970 年～1972 年にかけて運転認可の審査が行われている。したがって、その基準や審査の内容については、当時の技術に基づいたものであり、火災事故後のレビュー時における知見や技術と異なっている部分が見られることは必然であった。

事故当時のブラウンズフェリー原子力発電所は、それぞれ 1067MW の電力を生産するよう設計された沸騰水型の 3 つの原子炉で構成されていた。そのうち、1 号機と 2 号機は出力運転中であり、3 号機については建設中であった。また 1 号機と 2 号機は共通の制御室を有しており、その真下には原子炉建屋内から制御室へ布設されるケーブルのためのケーブル処理室が位置していた（図 52 と図 53 参照）。

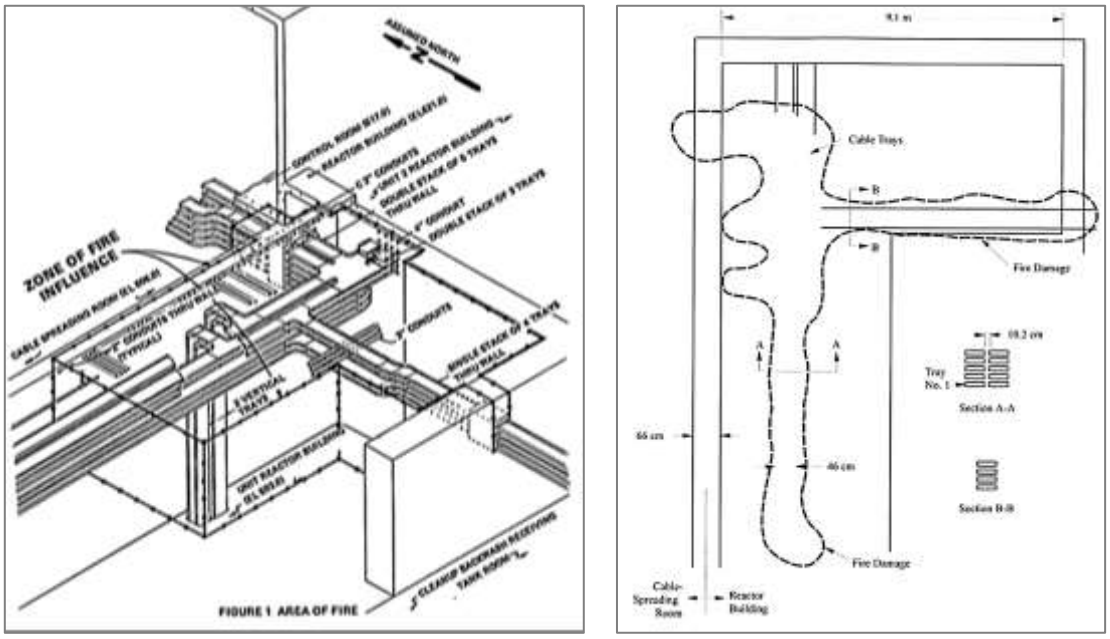


図 51　ブラウンズフェリー原子力発電所原子炉１号機火災事故の焼損範囲[3),4)]

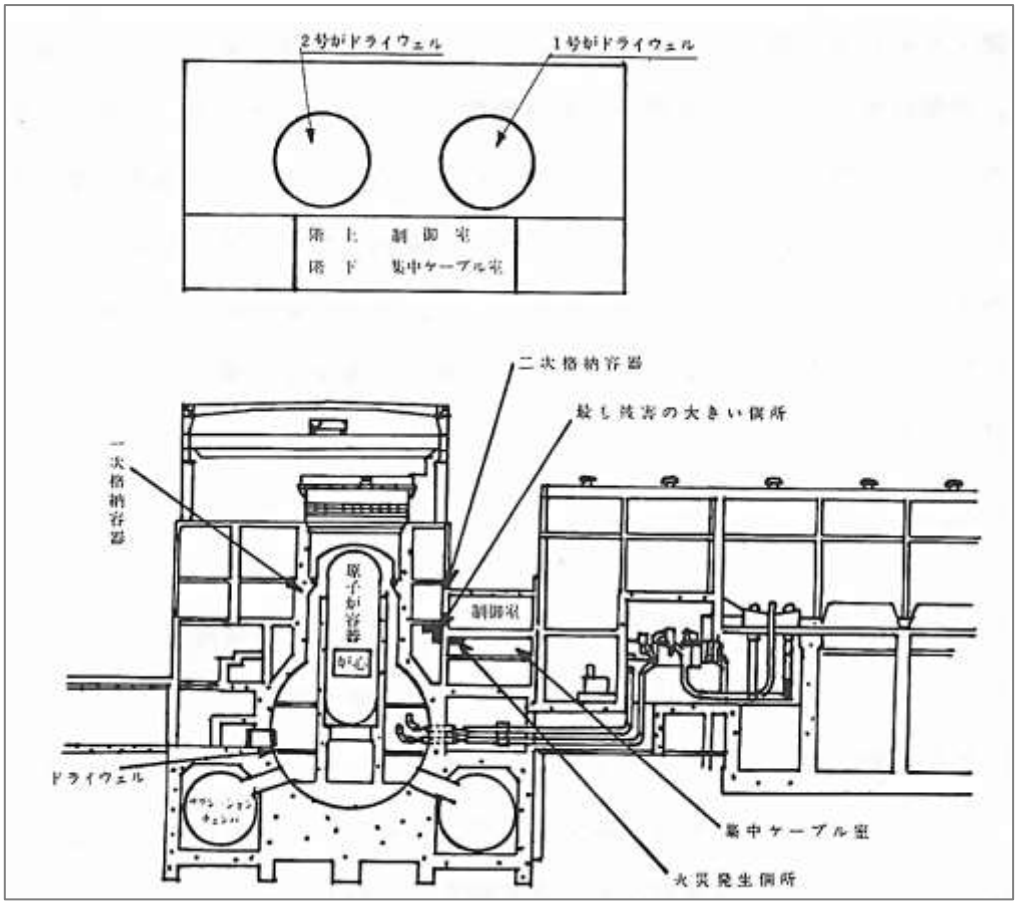


図 52　原子炉建屋の概要[6)]

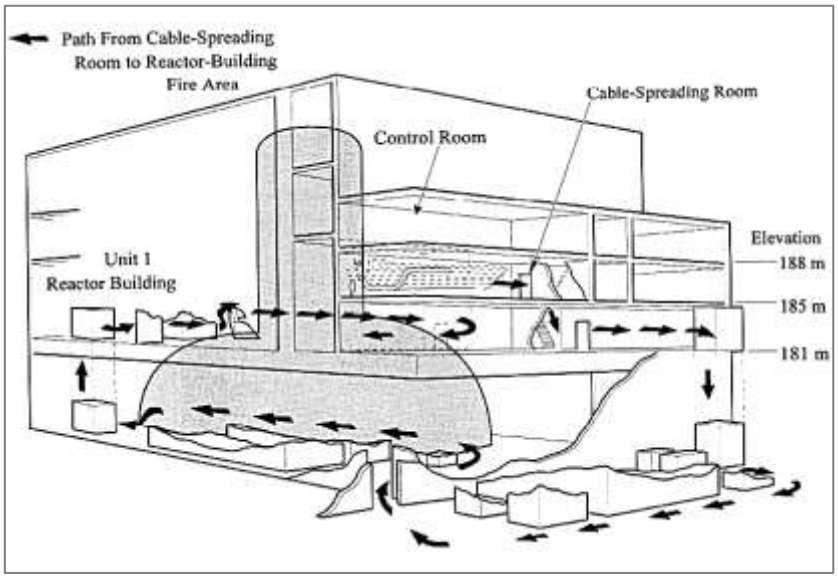


図 53　Browns Ferry 発電所の透視図[4)]

・<u>火災事故の経過[4),5)]</u>

1975 年 03 月 11 日の午後 12 時 20 分ごろ、ケーブル処理室と 1 号機原子炉建屋の間に位置するケーブル貫通孔において、現場作業員が空気漏洩の検知を目的として、ろうそくの火を貫通孔へ近づけたところ、漏洩シール材として使用されていたポリウレタンフォームへ誤って引火した（原子炉建屋側は常に負圧となっているため、漏洩シールの程度が不完全な場合は、空気の流れは処理室から原子炉建屋内へと吸い込まれる）。ポリウレタンの着火に伴い、その現場作業員は（手元にあったと思われる）懐中電灯や布きれで火炎をたたきつけ、窒息による消火を試みた。その後、出火室内に設置されていた可搬式の粉末消火器や CO_2 消火器を用いて、手動による消火活動が継続されたが、出火から約 15 分後に CO_2 消火システムの避難警報が発報し、午後 12 時 45 分から午後 13 時 00 分にかけて、CO_2 ガスの放出が行われた。なお、CO_2 消火システムの作動に伴い、漏洩シールが十分ではない貫通孔を通じて、制御室などへも CO_2 と煙の伝播が引き起こされたが、ケーブル処理室側の火災は鎮火することができた。

制御室への火災通報については、午後 12 時 35 分に火災警報（Fire alarm）の作動（ハードかソフトかは不明）によって行われた。その後、火災の周知を拡声装置で実施し、この頃までにはケーブル貫通孔のケーブルトレイを延焼経路とした、原子炉建屋内への火災の伝播が確認されていた。したがって、原子炉建屋内でも CO_2 消火器と粉末消火器による手動消火を試みたが、火災の延焼範囲がはしごを必要とする高さのケーブルであったこと、火災による煙の濃度が高かったこと、酸素マスクに限りがあったこと、などの理由により、その消火活動は散発的で困難を極めた。

午後 01 時 09 分には公設消防への通報を行ったが、消火活動への水の使用を躊躇したた

め、午後 04 時 30 分ごろまでは、CO_2消火器と粉末消火器による消火活動が継続された。その後、午後 05 時 30 分から午後 06 時 00 分の時点で、消火活動への水の使用が許可され、午後 07 時 00 分に消火栓を用いて放水が行われた（酸素マスクの不足により、作業員はホースを固定して一時待避した）。その放水開始から 15 分後、作業員が現場へ戻ったところ、継続的な燃焼の痕跡がないことを確認し、午後 07 時 45 分に鎮火の確認がなされた。

・**火災事故の分析** [5),7),8)]

この火災の進展に伴い、高熱と煙からの影響を受けた安全系の複数の機器が誤作動、誤表示を引き起こし、プラントの健全性を把握する能力が著しく低下した。なお、この火災が重大な事態に至った要因としては、①可燃性のポリウレタンフォームが貫通シール材として使用されていたこと、②燃焼しやすい絶縁体やシースで構成されたケーブルを敷設していたこと、③ケーブル貫通部における布設ケーブルの系統分離が図られておらず、火災による損傷が多系統に及んだこと、等が挙げられている。

出火プラントの基本設計（10CFR Part 50 Appendix A）では、安全停止系の多重防護（多重化）は満たされていたが、事故当時に存在していた火災防護の技術基準（Appendix A の指針Ⅰ-3）へ従うだけでは、火災の延焼により多重系が破たんする（制御系のケーブルが多重化されていても近接されて設置されていると延焼してしまう）という不備が発覚した（この火災延焼により、複数の安全システムが機能を喪失した）[5),7)]。

この結果、緊急措置として 1976 年 5 月、プラントをいくつかの火災区域に分け、出火区域以外の系統が火災損傷から保護されていることを立証するために、BTP（Branch Technical Position）APCSB 9.5-1 という技術要請書が、NRC から認可取得者（licensee）に向けて発行された。なお、この指針は 1976 年 7 月 1 日後に建設許可を受けた認可取得者を対象に適用されるものであった。したがって、この時点で既存のプラントおよび設計段階を過ぎ、建設に入っていたプラント等の設計、建設、または運転に大きな影響を与えることがないよう、NRC は BTP APCSB 9.5-1 における指針内容を修正し、BTP APCSB 9.5-1 の附則 A を発行した。

この BTP APCSB 9.5-1 の附則 A には、BTP APCSB 9.5-1 を適用した場合に、既存のプラントでは大幅なプラン変更（実用的にはほぼ不可能）が必要とされる区域へ対して、適用可能な代替案が含まれており [8)]、1981 年に 10CFR Part 50 の Appendix R を法規制として整備するまで、それ自体に法的な拘束力はないものの、実質的な規制基準として運用されることになった（BTP の内容を支持しない認可取得者が現れ、規制指針や要求内容の徹底化は困難を極めたことから、別途 10CFR Part50 Appendix R として、法規制を整備することになった）。

３－１－３　女川原子力発電所の電気盤火災事故[9),10),11),12)]

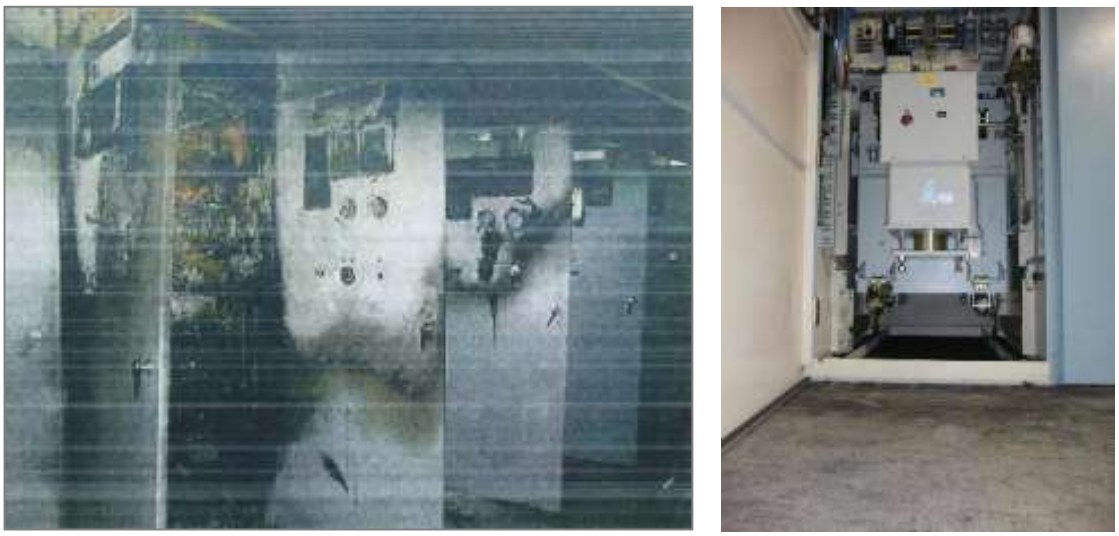


図 54　女川原子力発電所で発生した火災による電気盤の損傷状況（右：正常時）[9)]

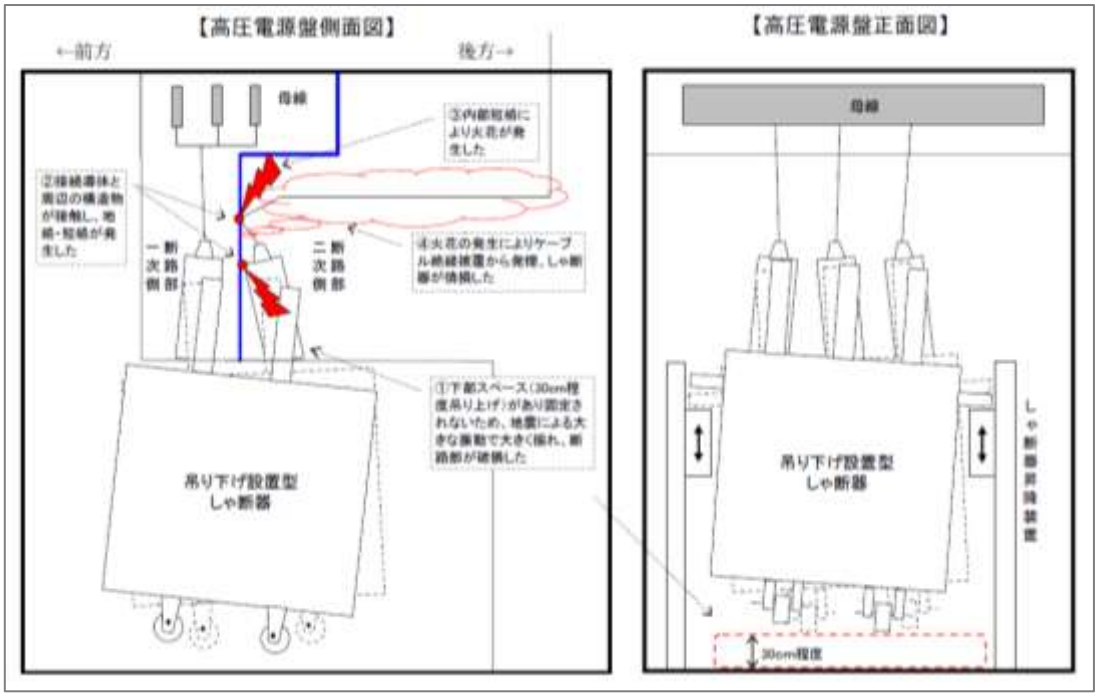


図 55　火災発生の推定メカニズム[10)]

・<u>火災事故の概要</u>[10),11),12)]

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震の影響に伴い、東北電力女川原子力発電所のタービン建屋地下 1 階で火災が発生した。この火災は地下 1 階に設置されていた 2 台の高圧電源盤で発生し、その出火原因については「高圧電源盤内の遮断器が、地震による振動で大きく揺れたため、当該遮断器の一次および二次側断路部の接続導体、絶縁物が変

形および破損し、接続導体と周囲の構造物が接触して短絡・地絡が発生し、それに伴うアーク放電の熱によって、盤内のケーブル絶縁被覆が溶け、発煙した」[11]と推定されている。なお、この火災では出火元と推定される電源盤から、常用メタクラ６－１Ａと呼称される全てのユニット（10 台の高圧電源盤を一列に設置していた）に延焼し、機能の喪失を引き起こした。また事故後に実施した火災試験の結果から、電気盤間の延焼経路はケーブルダクトである、と結論づけられている[12]。

・火災事故の背景[10),11)]

女川原子力発電所は、沸騰水型の 3 つの原子炉で構成されている。事故当時、1 号機と 3 号機が出力運転中であり、2 号機は起動準備（定期検査中）であった。地震の大きな揺れを感知し、1 号機と 3 号機では緊急停止が行われ、速やかに低温停止が達成された。この際、地震や津波による影響を受けて、一部の設備で被害が認められたものの、外部電源や非常用電源は確保されていた。なお、それらの被害による原子炉施設への影響はなく、外部への放射性物質の漏えいも確認されなかった。

・火災事故の経過[11)]

女川原子力発電所の原子炉 1 号機は出力運転中のところ、2011 年 03 月 11 日の午後 02 時 46 分に発生した、東北地方太平洋沖地震（発電所での観測震度 6 弱）により原子炉が自動停止した。午後 02 時 57 分に中央制御室で火災報知機が発報したため、施設運転員が現場確認に向かったところ、午後 03 時 30 分にタービン建屋地下階からの発煙を確認したことから、午後 03 時 41 分に公設消防へ 119 番通報を行った。

自衛消防隊消火班が発煙現場の確認および消火活動に向かったところ、発煙による視界不良のため、発煙発生箇所の特定ができないことから、タービン建屋内からの退避指示を実施したうえで、午後 05 時 15 分に二酸化炭素消火設備を起動した。その後、発煙の状況と関係する警報の発生状況からタービン建屋地下 1 階の高圧電源盤エリアが発煙発生箇所と推定し、現場確認を行ったところ、高圧電源盤である常用メタクラ 6－1Aのユニット No.7 および No.8（以下、「当該ユニット」という。）が焼損し、当該ユニット内部が過熱状態であることを確認したため、粉末消火器（合計 7 本）を用いて、消火活動を実施した。火災の鎮火確認については、本来であれば、消防署が行うことであるものの、地震および大津波の影響により、発電所の周辺道路は一部損壊しており、発電所の入構ができない状況であったため、協力企業の消防署勤務経験者が午後 10 時 55 分に消火を確認した。

その後、発電所の周辺道路の応急復旧が完了したため、03 月 22 日に公設消防による現場確認が行われ、本事象は火災であるとの見解が示されている。

・火災事故の分析[11),13)]

事故後の分析においては、当該ユニットを中心に高圧電源盤である常用メタクラ６－１

Ａ（以下、「当該盤」という。）全体に火災の延焼があり、当該ユニットの内部を確認したところ、盤内上部に位置する断路部付近の損傷が著しいことを確認した。なお、ここで強調すべきことは、従来の火災防護対策では、電気盤火災は単一の盤内に限定され、隣接する他の電気盤へは延焼しないという想定で安全設計がなされていた、という事実である[13)]。

また当該盤に使用していた遮断器は縦型で、母線との接続位置では昇降装置によって機器内部で３０ｃｍ程度吊り上げられた状態となっており、耐震架台等による固定は行われていなかった。したがって、地震等で大きな振動が加わると当該盤内の構造物が大きく揺れる可能性があった。

火災発生の推定メカニズムについては、当該盤内で接続位置にて吊り上げられていた部分が、地震による振動で大きく揺れたことによって、当該ユニットにおいては、断路部が破損し、接続導体と周囲の構造物が接触して短絡・地絡が発生し、これに伴い発生したアーク放電の熱により盤内ケーブルの絶縁被覆が溶け、発煙したものと推定される。なお、この事故の教訓に基づき、吊り下げ型の遮断器については、横置き型の遮断器へ設備更新する措置が取られることになった。

そのほか規制組織等においては、現象の解明等に係る火災試験が実施されている[12)]。なお、この事象については、高エネルギーアーク故障（High Energy Arcing Fault、以下 HEAF）と位置付けられており、OECD/NEA などの国際共同プロジェクトとして、現象の解明や有効な評価手法の整備を目指しているところである。以下、参考までに HEAF に関する定義を紹介する。

なお、女川原子力発電所において、この火災事故が ECCS の継続運転へ影響を与えなかった理由としては、火災で機能を喪失した電気盤が常用であったためであり、仮に非常用のもので火災が発生していた場合は、女川原子力発電所では外部電源や非常用電源も確保されていたことから、福島第一原子力発電所と全く同じ結果になるとは考えにくいが、炉心の冷却については難航していた可能性もある。またこの電気盤については、原子力発電所特有の設備ではなく、他の発電所にも使用されているものであるため、規制としては「電気事業法」の範疇であり、「原子炉等規制法」の範囲外であることも参考までに記しておく。

・<u>HEAF の定義[14)]</u>

- 通電された導体の間、または通電された電気機器と中性点（すなわち地面）の間で発生する高電流アークのために、圧力上昇、気化した金属、光、熱といった形態による急速なエネルギー放出が生じる、エネルギー値の高い、爆発性のある電気設備の故障である。

３－２　火災統計を用いたケーブル火災に関する検討

ここでは、日本におけるケーブル火災の発生傾向を把握することを目的とし、総務省消防庁のデータベース「火災報告」を用いた検討を実施する。またその検討項目としては、火災の発生件数、火災の焼損面積を設定し、火災統計の整理を行った。したがって以下では、火災事例の収集方法やその分類結果について記述する。

３－２－１　分類方法

1995 年から 2014 年までの 20 年間で、火災報告を用いた統計の分類を行うことにする。ここで火災報告とは、総務省消防庁の要綱に基づき [15]、国内における火災事故がデータベース化されている統計（有料）であり（例年、夏頃に前年度分の集計が完了し、総務省消防庁の総務課窓口にて、開示請求することで入手することができる）、毎年発行される消防白書の基データとしても用いられるものである。また火災報告の中には、火元の業態、火元の用途、出火原因、着火物など、大中小細といった規模で、分類項目および分類番号が存在しており、今回の検討ではこれらの分類項目に基づき、火災統計の整理を実施している。

なお、1995 年～2014 年の期間を扱う上で強調しておきたいことは、この 20 年間において、日本標準産業分類が第 10 回改定（1993 年）、第 11 回改定（2002 年）、第 12 回改定（2007 年）の 3 回に亘って変更されていることである [16),17),18)]。したがって、火災報告の業態に関する分類についても、それらの改定内容へ追随しているため、検討対象とする火災事例を収集する際には注意が必要である。

また本論文では、最終的に業態の「電気業」について、絞り込むことを考えている。したがって「電気業」についてのみ、表 43 へ改訂ごとの変遷を一覧として整理した。なお、日本標準産業分類については、既に第 13 回改訂が行われており、平成 26 年 04 月 01 日より適用されている [19)]が、電気業の分類については変更されていないため、表中への記載を省略することにした。

また本論文においては、火元の業態（例えば分類番号 3311：発電所）、発火源（例えば分類番号 1501：送電線）、着火物（例えば分類番号 192：電線被覆）の分類項目に着目し、国内ほぼ全ての火災事故から分析対象であるケーブル火災の事例を選別し、収集を行った。したがって表 44 には、その火災事例の選別に用いた分類項目を示している。加えて、ケーブル火災については、外部からの熱衝撃により出火へ至る火災（外部要因）と、内部からの熱衝撃により出火へ至る火災（内部要因）の 2 つに大別することができ、ここでは前者については「外部要因」、後者については「内部要因」といったデータ群へ分類し、統計データを整理している。なお、ケーブル火災の定義や事例の収集手順については、次節で述べることにする。

表 43　日本標準産業分類の変遷 [16),17),18),19)]

＜第10回改定＞	＜第11回改定＞	＜第12回改定＞
適用期間：1995年～2003年	適用期間：2004年～2007年	適用期間：2008年～2014年
大分類 G－電気・ガス・熱供給・水道業	大分類 G－電気・ガス・熱供給・水道業	大分類 F－電気・ガス・熱供給・水道業
35　電気業 (新33へ)	33　電気業	33　電気業
		330　管理，補助的経済活動を行う事業所(33 電気業)
		3300　主として管理事務を行う本社等
		3309　その他の管理，補助的経済活動を行う事業所
351　電気業 (新331へ)	331　電気業 (新330，331へ)	331　電気業 (旧331の一部から)
3511　発電所 (新3311へ)	3311　発電所	3311　発電所
3512　変電所 (新3312へ)	3312　変電所	3312　変電所
3513　電気事業所(本社，営業所等) (新3313へ)	3313　電気事業所(本社，営業所等) (新3300，3309へ)	

※適用期間については、本節における分析期間 1995 年～2014 年において、どの改定時期の分類を適用して各データを収集するべきか、という観点で整理している。

※赤塗り部分については、改定により何かしらの変更がなされた項目を示している。

※表中の適用期間については、データベースの記載内容から判断している。例えば、第 11 回改定は 2002 年に実施されているが、2003 年度のデータベース内には、分類番号 3311 は存在せず、従来の分類番号 3511 が使用されている。したがって、第 11 回改定の適用期間については、2004 年度からであると判断した（そのほか所々で分類番号の混在が見られる）。

表 44　分析対象の選別に用いた火災報告上の分類項目と分類番号 [15)]

火元の業態	出火原因	
電気業	発火源	着火物
3511 or 3311 発電所	1501 送電線，1502 配電線(低圧)，1503 配電線(高圧)，1504 引込線(低圧)，1505 引込線(高圧)，1506 屋内配線，1507 コード，1508 器具付きコード，1509 配線接触部，1510 屋外線，1511 接地線，1512 電話配線，1513 有線放送配線，1514 コンピューター配線，1515 CATV 配線，1516 その他の配線，1517 変電設備内配線(高圧)，1518 交通機関内配線(スパークプラグ)，1519 交通機関内配線(デストリビュータ)，1520 交通機関内配線(イグニッションコイル)，1521 交通機関内配線(コンタクトブレーカー)，1522 交通機関内配線(その他)，1599 その他の電灯電話等の配線	192 電線被覆，417 電気配線類，427 電気配線類

３－２－２　ケーブル火災の定義と火災事例の収集手順

本論文におけるケーブル火災の定義、ケーブル火災事例の収集手順については、それぞれ以下の通りとする。

ケーブル火災の定義

火災報告上の分類項目である「発火源」または「着火物」において、表 44 へ示した分類番号のいずれかを含む火災事例については、全てケーブル火災として定義する。

ケーブル火災事例の収集手順

① 火災報告上の分類項目である「発火源」を用いて、表 44 へ示した分類番号 1501～1599 に該当しているものを選別する（データ群 A)。この操作によって得られたデータ群を、以降では「内部要因」として整理する。

② 火災報告上の分類項目「着火物」を用いて、表 44 へ示した分類番号 192，417，427 に該当しているものを選別する（データ群 B)。次に火災報告上の分類項目「発火源」を用いて、表 2 へ示した分類番号 1501～1599 に該当するものを選別し（データ群 C)、データ群 B からデータ群 C を除くことにする。これらの操作によって得られたデータ群を、以降では「外部要因」として整理する。なお、データ群 C については、データ群 A（内部要因）に含まれているため、上述の操作を行っている（図 56 参照)。

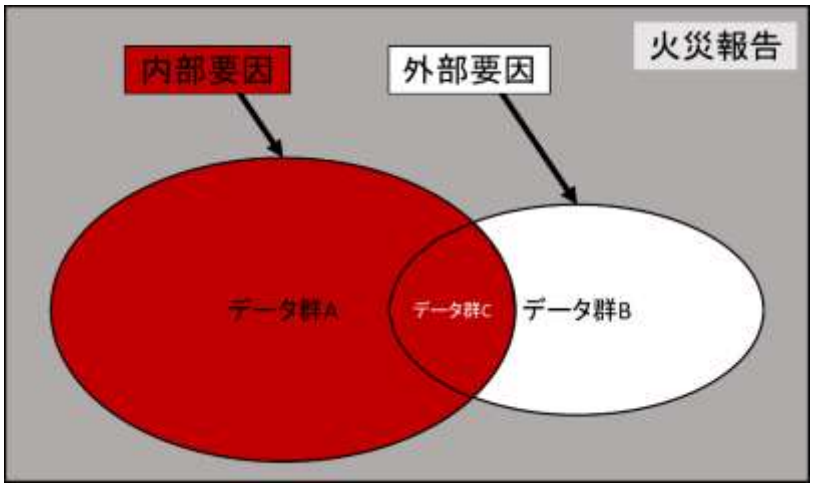


図 56　内部要因と外部要因のデータ分類

なお、上記の手順で選別したデータ群は、比較的高い確度でケーブルが寄与する火災事例を収集できているものと考える。しかしながら出火原因における「経過」の分類項目にのみ、ケーブルの情報を含んでいる火災事例も存在すると思われ、今回の分類結果には、そのような火災事例が含まれていないことに留意されたい。またケーブル火災の定義においては、強

電流電線・ケーブルと弱電流電線・ケーブルに加えて、配線類についてもケーブル火災として定義している。したがって、この点についても同様に留意されたい。

ここで、前述したデータ群「内部要因」と「外部要因」について補足する。例えば、ある火災の着火源（火災報告上の発火源）と着火物（火災報告上の着火物）が電線・ケーブルである場合、もしくは着火源（火災報告上の発火源）は電線・ケーブルであり、着火物（火災報告上の着火物）がその他可燃物である場合、その火災事例はケーブル火災（内部要因）として扱うことができる。

一方、ある火災の着火源（火災報告上の発火源）は電線・ケーブルではないものの、その着火物（火災報告上の着火物）が電線・ケーブルである場合、その火災事例はケーブル火災（外部要因）として扱うことができる。

つまり、ケーブル火災の原因としては、過電流に代表される内部からの熱衝撃に伴う内部要因と、高温への熱暴露に代表される外部からの熱衝撃に伴う外部要因へ大別することができる。したがって本論文で選別した「内部要因」と「外部要因」のデータ群については、ケーブル火災の原因（内部要因と外部要因）にリンクしているものと考える。

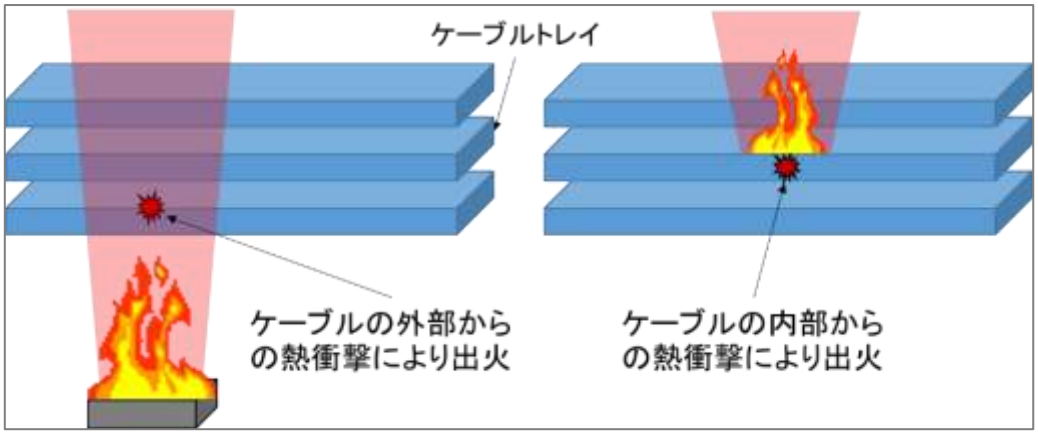


図 57　ケーブル火災原因の分類（外部要因と内部要因）

３－２－３　分類結果

３－２－３－１　ケーブル火災の発生件数

上述した手順で火災報告から収集したケーブル火災の発生件数を以下の通りに整理する。

表 45　国内におけるケーブル火災の発生件数（1995 年～2014 年）

該当年（西暦）	外部要因（件，%）	内部要因（件，%）	合計（件）	該当年（西暦）	外部要因（件，%）	内部要因（件，%）	合計（件）
H07(1995)	953，30.1	2210，69.9	3163	H17(2005)	1023，31.1	2268，68.9	3291
H08(1996)	916，29.1	2237，70.9	3153	H18(2006)	997，31.4	2175，68.6	3172
H09(1997)	1017，31.2	2246，68.8	3263	H19(2007)	934，31.6	2018，68.4	2952
H10(1998)	1079，31.2	2377，68.8	3456	H20(2008)	923，31.6	1999，68.4	2922
H11(1999)	1112，31.2	2450，68.8	3562	H21(2009)	768，29.2	1858，70.8	2626
H12(2000)	1214，30.7	2736，69.3	3950	H22(2010)	873，31.8	1870，68.2	2743
H13(2001)	1157，31.2	2546，68.8	3703	H23(2011)	893，30.8	2010，69.2	2903
H14(2002)	1154，32.0	2450，68.0	3604	H24(2012)	799，29.7	1892，70.3	2691
H15(2003)	1063，31.8	2282，68.2	3345	H25(2013)	789，30.6	1793，69.4	2582
H16(2004)	1126，31.3	2468，68.7	3594	H26(2014)	750，29.8	1767，70.2	2517

※該当年の欄にある H の頭文字は「平成」を意味し、合計値のパーセント表記は省略することにした。また「外部要因」と「内部要因」については、グラフ中では簡単のために、前者を「外部」、後者を「内部」と表記している。

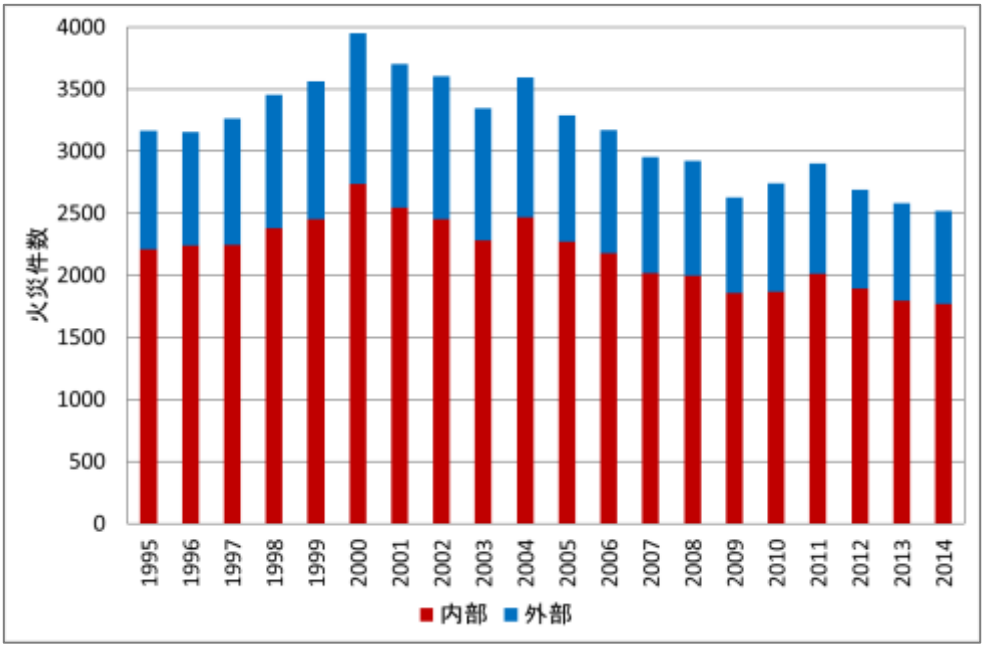


図 58　国内におけるケーブル火災の発生件数（1995 年～2014 年）

表 45 および図 58 のように、過去 20 年間におけるケーブル火災の発生件数を整理すると、日本で 1 年間に発生する火災事例のうち、3000 件程度の火災事例がケーブルと関係していることが見て取れる。また内部要因と外部要因の内訳については、各年度によって変動しない 7 対 3 の関係があり、ケーブル火災の発生件数だけで述べてみると、外部からの熱衝撃に起因する火災よりも、内部からの熱衝撃に起因する火災の方が、火災の発生頻度は高いことを把握した。

３－２－３－２　ケーブル火災の焼損床面積と焼損表面積

前節では過去 20 年間において、一年間あたりに何件ほどのケーブル火災が発生しているか、その実態や傾向について把握した。ここでは、外部要因と内部要因でその被害程度を比較するために、火災報告における「焼損床面積」および「焼損表面積」を用いた分析を実施する。

火災報告における焼損床面積と焼損表面積[15)]の解説

火災報告における建物の焼損面積については、「焼損床面積」と「焼損表面積」の 2 つに区別して、それぞれを別途算出しており、論文中で「焼損面積」という言葉を使う場合は、それらの和を意味しているものと解釈されたい。以下、「焼損床面積」と「焼損表面積」の違いについて述べることにする。

・<u>焼損床面積</u>

火災による建物の焼損が立体的に及んだ場合は、その部分の床面積は、算定要領に基づき、算出される。これが焼損床面積であって、平方メートルで示されている。したがって焼損床面積とは、立体的に機能を有している建物が、火災によって焼損し、その機能が失われた部分の床面積を指している。なお、ここでいう床面積とは、床の面積とは異なっており、建築基準法施行令における「壁その他区画の中心線で囲まれた部分の水平投影面積」のことである。したがって、機能を失った部分の床面積とは、その空間の床又は天井と、その空間を構成している表面との、2 面以上の焼損があった平面によって囲まれている部分の床又は天井から水平投影した床面積のことである。また水平投影に接する焼損部分については、立体の構成部分として包含することになっている。

・<u>焼損表面積</u>

建物の焼損が部分的であり、立体的に焼損が及ばなかった場合は、焼損表面積として算出し、平方メートルで表される。つまり焼損表面積とは、内壁、天井、床板等部分的な焼損範囲を示したものである。

以下、図 59 と表 46 を用いて両者の違いを例示する。

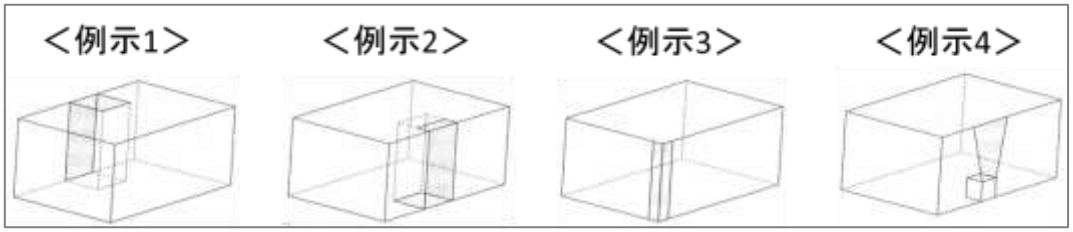


図 59　焼損床面積と焼損表面積の例示[15)]

表 46　焼損面積の算定方法（具体例）[15)]

ケーススタディ	例示１	例示２	例示３	例示４
焼損箇所	天井、壁体	床、天井、壁体	壁体２面	壁体、収容物
焼損程度 （図中灰色）	天井 2.0m²焼損 壁体 5.0m²焼損	床　3.0m²焼損 天井 1.0m²焼損 壁体 5.0m²焼損	壁体 5.0m²焼損	壁体 3.0m²焼損 収容物　焼損
判断基準	・天井、壁体の 2 面以上の焼損がある。 ・天井の焼損部分を床に水平投影し、これに接する部分は立体の構成部分として焼損床面積に含む。	・床、天井、壁体の 2 面以上の焼損がある。 ・床の焼損部分を天井に水平投影し、これに接する焼損部分は立体の構成部分として焼損床面積に含む。	・壁体 2 面以上の焼損であるが、水平投影しても立体とならない。部分的な焼損である。	・壁体 1 面の焼損であり、部分的な焼損である。収容物は立体の構成部分ではない。
損害状況	・焼損床面積 2.0m² ・焼損表面積 0.0m²	・焼損床面積 3.0m² ・焼損表面積 0.0m²	・焼損床面積 0.0m² ・焼損表面積 5.0m²	・焼損床面積 0.0m² ・焼損表面積 3.0m²

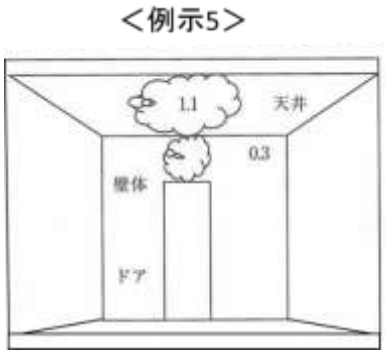


図 60　焼損面積の算定方法（補足）[20)]

また図 60 に示したように、天井面が 1.1 平方メートルで壁体が 0.3 平方メートル焼損している場合は、火災調査書類には階段室内の天井面 1 平方メートル及び壁体面若干（0.3 では四捨五入すればゼロになることから、若干と表記している。）と表現されている。したがって、焼損表面積 1.4m²と焼損表面積 0.5m²の場合、火災報告上ではいずれも 1 平方メートルとなる。つまり火災報告において、焼損表面積の数値が同じ表記であっても、焼損程度は「ぼや」と「部分焼」のように異なることがある点に留意されたい。

ここまでを押さえた上で、ケーブル火災の焼損面積について、「焼損床面積」と「焼損表面積」で整理する。以下の表 47、図 61、図 62 では、ケーブル火災の焼損面積について、「焼損床面積」と「焼損表面積」ごとの整理を行った。

表 47　ケーブル火災の焼損床面積と焼損表面積

該当年（西暦）	外部火災			内部火災		
	焼損床面積[m²]	焼損表面積[m²]	合計焼損面積[m²]	焼損床面積[m²]	焼損表面積[m²]	合計焼損面積[m²]
H07(1995)	12132	2033	14165	54864	6795	61659
H08(1996)	17412	2228	19640	57524	8603	66127
H09(1997)	16475	1780	18255	61815	6235	68050
H10(1998)	10634	1510	12144	69076	8622	77698
H11(1999)	14486	2163	16649	71671	7955	79626
H12(2000)	14168	1956	16124	77831	9353	87184
H13(2001)	17968	2281	20249	82085	8179	90264
H14(2002)	25061	1980	27041	81194	9292	90486
H15(2003)	13434	1501	14935	68536	5485	74021
H16(2004)	16851	4864	21715	80866	6993	87859
H17(2005)	16354	1755	18109	70020	6772	76792
H18(2006)	13263	1838	15101	67966	7842	75808
H19(2007)	16627	3616	20243	77204	6869	84073
H20(2008)	14979	1577	16556	62220	6674	68894
H21(2009)	11633	1169	12802	64750	5890	70640
H22(2010)	13459	2129	15588	81585	8380	89965
H23(2011)	24533	1297	25830	79571	8051	87622
H24(2012)	15751	1893	17644	61952	5220	67172
H25(2013)	11871	965	12836	55167	7257	62424
H26(2014)	9105	990	10095	69221	7314	76535

※該当年の欄にあるＨの頭文字は「平成」を意味する。

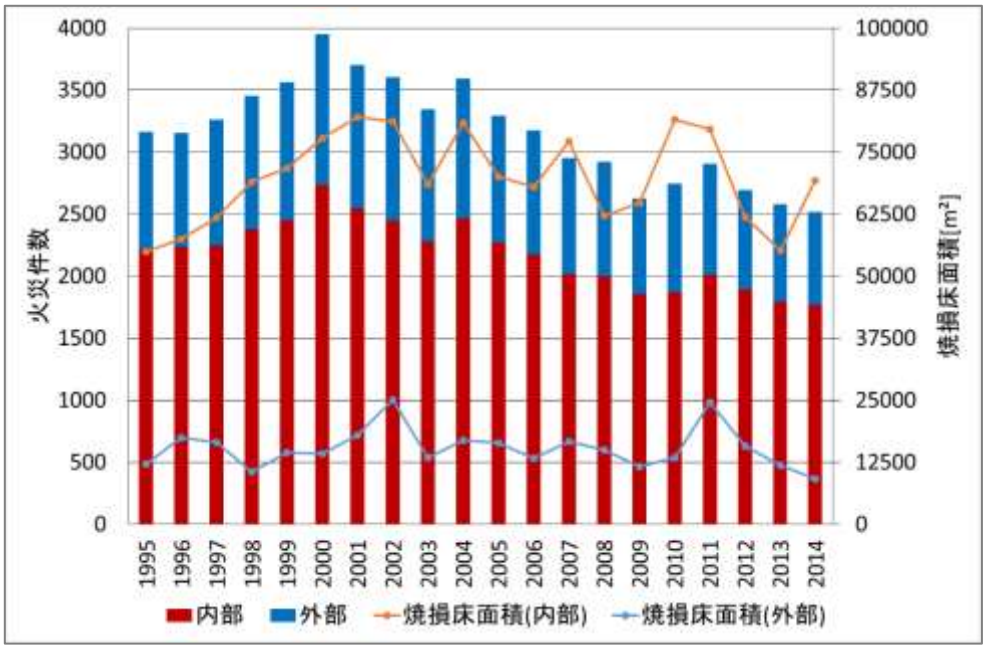


図 61　焼損床面積の比較（内部要因と外部要因）

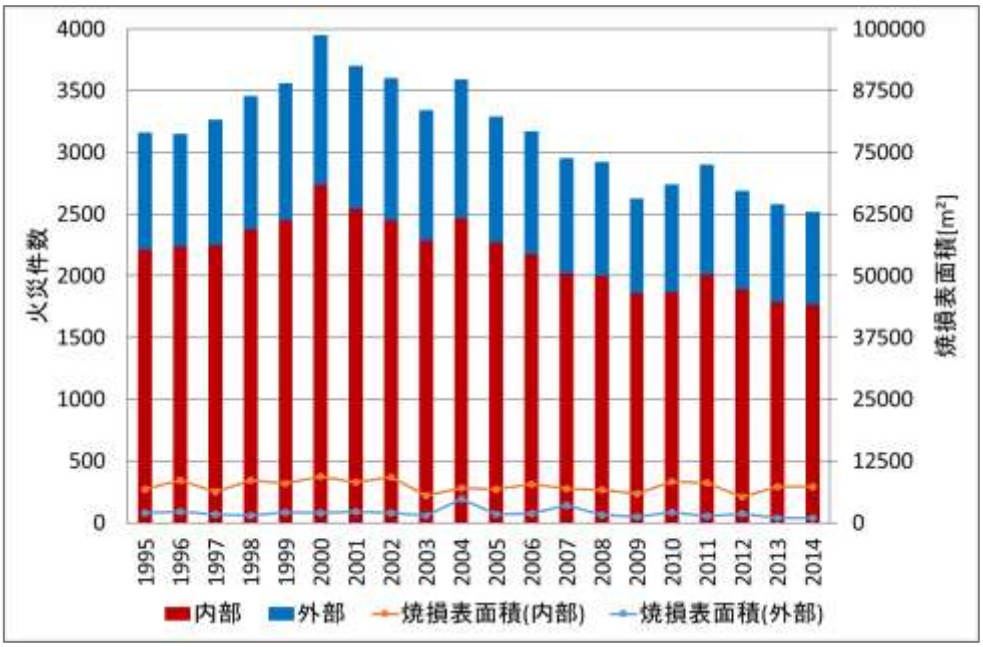


図 62　焼損表面積の比較（内部要因と外部要因）

図 61 と図 62 から焼損床面積と焼損表面積を比較すると、焼損床面積の方が焼損表面積よりも大きくなる傾向が見て取れる。このことからは、ケーブル火災の焼損範囲については、機器のみに限定されるわけではなく、より広い範囲で立体的な損傷が生じる傾向にある、という実態が把握できる。また焼損面積については、ケーブル火災における 1 年間の総合焼損

面積で比較することに少々問題があるように思えることから、ここでは火災 1 件あたりの焼損面積について、1 年間ごとに整理することにした。なお、ここでいう「焼損面積」とは、「焼損床面積」と「焼損表面積」を足し合わせた面積のことである。

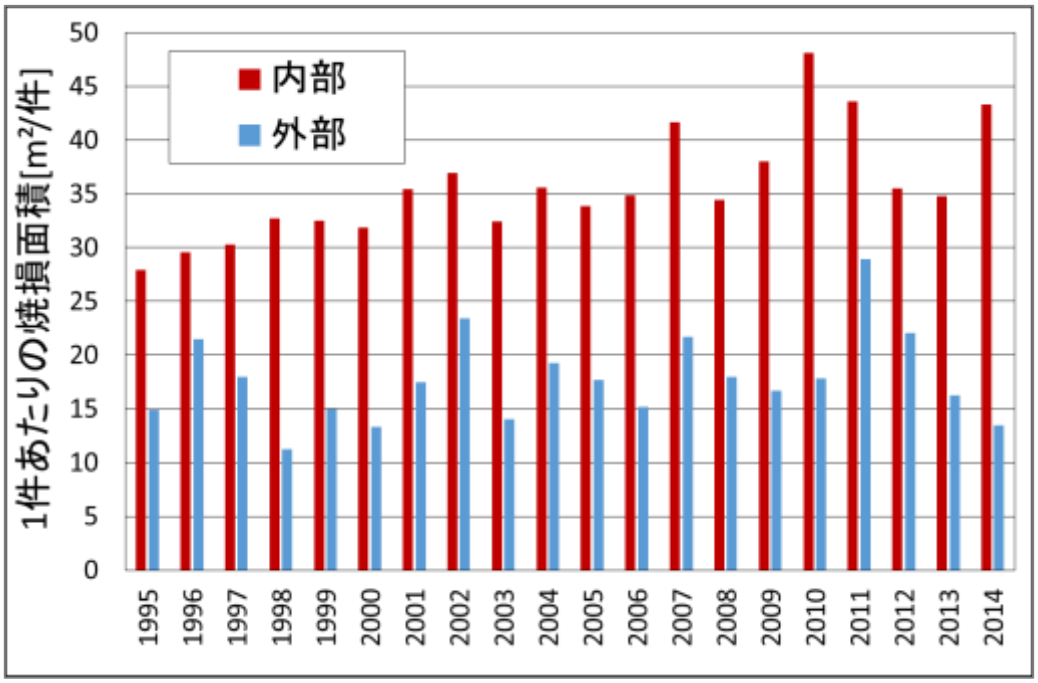


図 63　火災 1 件あたりの焼損面積の比較（内部要因と外部要因）

図 63 にはケーブル火災について、火災 1 件あたりの焼損面積を年度ごとに整理している。その全体的な傾向としては、内部要因の火災の方が外部要因の火災よりも、火災 1 件あたりの焼損面積は広くなる傾向にあり、その差はおおよそ 2 倍程度である。したがって、本論文におけるケーブル火災の定義に従うならば、ケーブル火災のリスクについては、外部からの熱衝撃による火災（外部要因）よりも、内部からの熱衝撃による火災（内部要因）の方がその発生頻度は高く、焼損範囲も広くなることから、内部要因の火災の方がリスクは高いということができる。

しかしながら、ここで述べているケーブル火災の中には、配線の類いが含まれていることから、使用電圧の大小や、電流の大小に関して、火災との相互関係を把握することはできていない。また火災種別（建築火災、林野火災、車両火災、船舶火災、航空機火災、その他の火災）についても、今回の事例分類では区別しておらず、火災原因の詳細な分析についても行っていないことから、それらについては今後の課題とする。

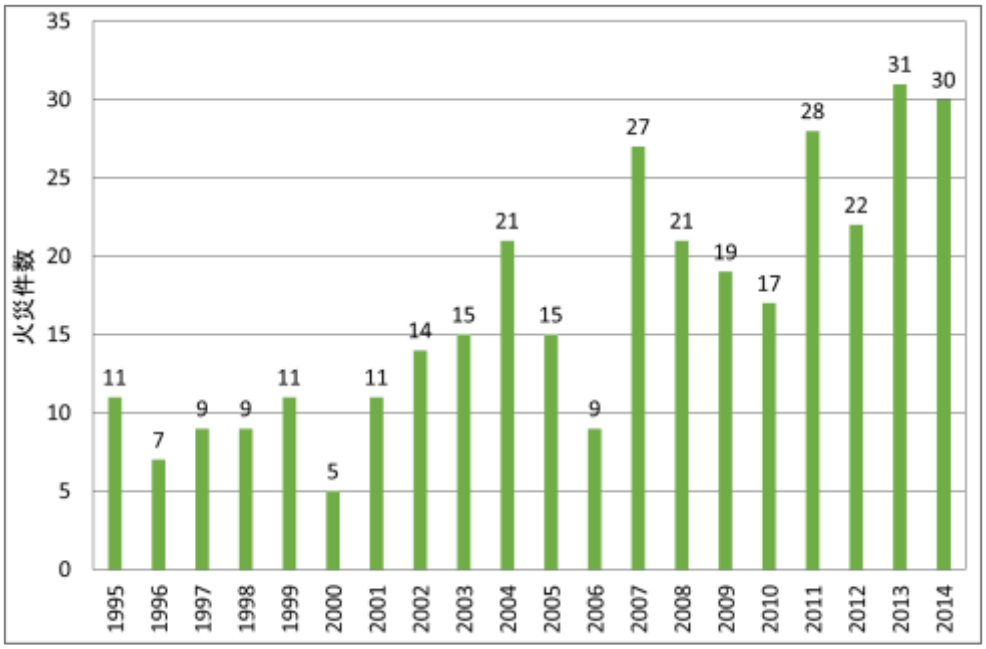


図 64　過去 20 年間の発電所における火災発生件数（N=332）

図 64 には、過去 20 年間の国内の全発電所（水力、火力、原子力、ガスタービン、地熱）における火災発生件数を示している。1995 年から 2014 年の 20 年間にかけては、合計 332 件の火災事故が発生しており、その平均発生件数は 16.6 [件／年]である。また上述の方法でケーブル火災を抽出したところ、合計 48 件のケーブル火災が発生していることを把握した。なお、その内訳については、内部要因の火災は 17 件、外部要因の火災は 31 件となっている。したがって、過去 20 年間におけるケーブル火災の発生件数は、発電所で発生した火災事故のうち約 14%を占めており、外部要因による火災の方がその発生頻度は高くなっている。

３－３　ケーブル火災の発生（発火）メカニズム

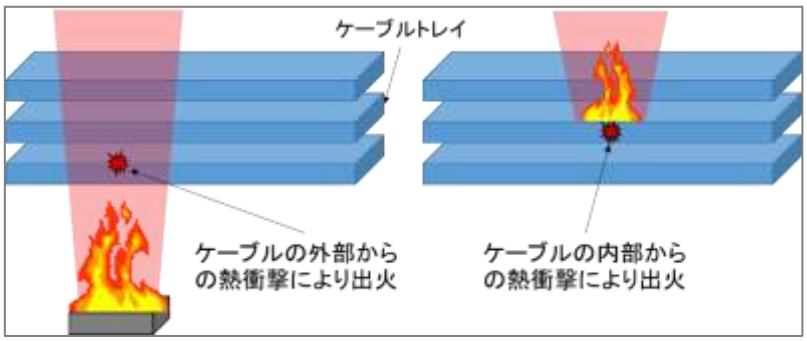


図 65　ケーブル火災の分類（外部要因と内部要因）

図 65 へ示したように、一般的なケーブル火災については、ケーブルの外部からの熱衝撃によって出火する火災（外部要因）と、ケーブルの内部からの熱衝撃によって出火する火災（内部要因）の 2 つに大別することができる。そのうち、前者の代表例としては、溶接火花等に起因する火災が挙げられ、後者については、過電流等に起因する火災が挙げられる。以下、それらの発生機構に関して、考察に基づく整理を実施する。

●　ケーブル火災（外部要因）の発生メカニズム

ここでは、外部からの熱衝撃によるケーブル火災（以下、熱暴露火災）の発生メカニズムについて記述する。なお、以下の内容については、筆者の考察からケーブルが発火に至るまでの現象について、ステップごとの整理を試みたものである（図 66 参照）。

・<u>熱暴露火災の発生メカニズム</u>

【ステップ】

① 外部からの熱暴露により、ケーブル表面の構成材料が加熱される。

② 加熱によってケーブル表面の構成材料が温度上昇すると、ケーブル構成材料の熱分解、相変化および含有水分の蒸発が生じる。

③ 熱分解の進展に伴い、ケーブル近傍における発生ガスの濃度および温度が上昇し、ケーブルの発火機構については、以下の条件に従うものと考えられる。

【ケーブルが発火する条件：着火源が存在する場合】

- ケーブル構成材料の温度が、材料固有の引火温度へ到達する場合。

【ケーブルが発火する条件：着火源が存在しない場合】

- ケーブル構成材料の温度が、材料固有の発火温度へ到達する場合。

【ケーブルが発火しない条件】

- ケーブル構成材料の温度が引火温度または発火温度へ到達しない場合。

● ケーブル火災（内部要因）の発生メカニズム

ここでは、内部からの熱衝撃によるケーブル火災（以下、過電流火災）の発生メカニズムについて記述する。なお、以下の内容については、第 4 章で述べる火災実証試験の結果から、その発火メカニズムを考察し、ケーブルが発火に至るまでの現象について、ステップごとの整理を試みたものである（図 67 参照）。

・過電流火災の発生メカニズム

【ステップ】

① 過電流によるジュール熱で導体が発熱し、導体周りのケーブル構成材料が加熱される。

② 加熱によってケーブルの内部構成材料が温度上昇すると、内部構成材料の熱分解および含有水分の蒸発が生じる。

③ ケーブルシースの下に熱分解ガス等が充満し、それに伴うシース内部圧力の上昇およびシースの温度上昇による機械的性質の変化により、シース部分が膨張する。

④ シースの膨張は機械的な強度の限界まで継続し、その後シースが破裂すると、破裂箇所から熱分解ガス等の可燃物を含んだ高温ガスが噴出する。

⑤ 発生ガスの噴出が継続するに伴い、可燃性ガスの濃度および温度が上昇し、ケーブルの発火機構については、以下の条件に従うものと考えられる。

【ケーブルが発火する条件：着火源が存在する場合※】

- 発生した可燃性ガスの濃度、および温度が燃焼限界へ到達する場合。
- 発生した可燃性ガスの濃度、および温度は燃焼限界へ到達しないが、ケーブル構成材料の溶融等により高温の導体がむき出しとなり、かつ、絶縁体またはシースの温度が、材料固有の引火温度へ到達する場合。

【ケーブルが発火する条件：着火源が存在しない場合】

- 発生した可燃性ガスの濃度、および温度が燃焼限界へ到達する場合。
- 発生した可燃性ガスの濃度、および温度は燃焼限界へ到達しないが、絶縁体またはシースの温度が、材料固有の発火温度に到達する場合。

【ケーブルが発火しない条件】

- 発生した可燃性ガスの濃度、および温度が燃焼限界へ到達しない場合。
- 絶縁体またはシースの温度が、材料固有の引火温度へ到達しない場合。
- 絶縁体またはシースの温度が、材料固有の引火温度に到達するが、ケーブル構成材料の溶融等により高温の導体がむき出しとならない場合。

➢　絶縁体またはシースの温度が、材料固有の発火温度に到達しない場合。

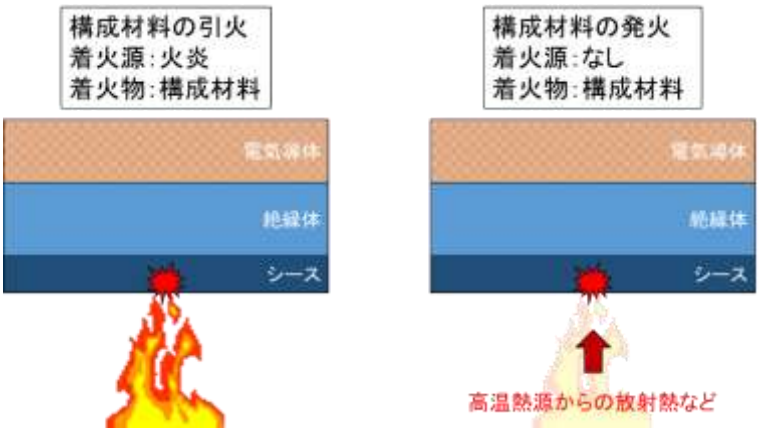


図 66　ケーブルの熱暴露火災に関する発火機構の整理

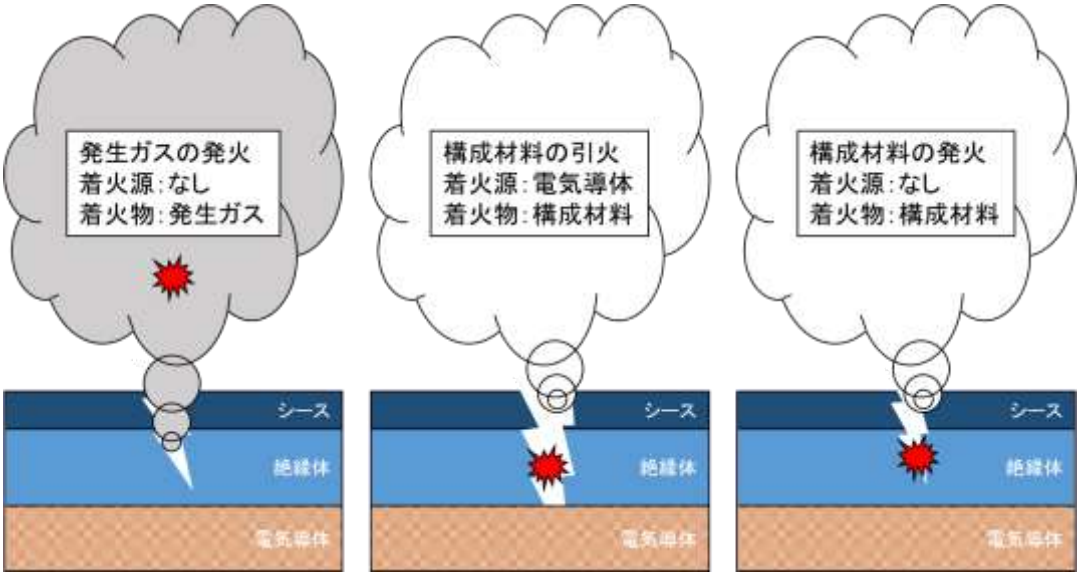


図 67　ケーブルの過電流火災に関する発火機構の整理

３－４　まとめ

本章では、ケーブル火災の実態を把握することを目的として、電線とケーブルが寄与する火災について、以下の内容を整理した。

- 電線とケーブルの代表的な火災事例については、ニューヨーク市電話局の火災、ブラウンズフェリー原子力発電所の火災、女川原子力発電所の火災を選別し、それらの事故概要について、それぞれ文献に基づく調査を実施した。その結果、電線とケーブルが寄与する火災については、それらの布設経路に沿って火災が延焼するという特徴があり、特にケーブルの貫通部に関しては、適切な防火措置を図る必要があることを把握した。
- 電線とケーブル火災の実態については、火災統計を用いて電線とケーブルが寄与する火災事例を抽出し、それらの事例分類を行った。その結果、ケーブル火災について、「内部要因」と「外部要因」のように区別し、それぞれの火災件数と焼損面積に関する比較を行ったところ、ケーブル火災の発生頻度については、内部要因の方が高く、焼損面積についても内部要因の方が広くなる傾向があることから、ケーブル火災のリスクについては、内部要因の方が高い傾向にあることを把握した。
- 発電所における火災事例の整理からは、ケーブル火災が占める割合等を算出することで、発電所におけるケーブル火災の実態を簡易的に把握した。
- 外部からの熱衝撃により出火する火災（外部要因）については、熱暴露火災を想定し、その発生メカニズムに関する考察から、ケーブルが発火へ至るまでの現象について、ステップごとの整理を行った。その結果、熱暴露火災の場合は、固体の着火現象における引火温度または発火温度の考え方に基づき、火災の発生メカニズムを考察した。
- 内部からの熱衝撃により出火する火災（内部要因）については、過電流火災を想定し、その発生メカニズムについては実証試験に基づく考察から、ケーブルが発火へ至るまでの現象について、ステップごとの整理を行った。その結果、過電流火災の場合は、固体の着火現象における引火温度または発火温度のみではなく、熱分解ガス自体の自己発火（Self Ignition）の考え方も含めて、火災の発生メカニズムを考察した。
- 熱暴露火災と過電流火災の発火機構に関する最大の相違点は、着火源（Ignition Source）の有無であることを考察によって明らかにした。

参考文献

1）NFPA：‘New York Telephone Exchange Fire’, February 27, 1975, Preliminary Report, NFPA Fire Analysis Deprtment, http://www.nfpa.org/research/fire-investigations/non-residential-properties

2） http://blogs.cisco.com/cle/from-telco-tragedy-to-recovery-in-28-days

3） NRC：‘Photographs from Browns Ferry Nuclear Power Plant Fire’, April 3, 1975, http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/brochures/br0361/s1/photos-bfn-fire.pdf

4） NRC：‘Browns Ferry Fire Heritage Discussion by Region II on the 30th Anniversary of the BFN Fire (2005)’, http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/brochures/br0361/s1/bfn-fire-heritage.pdf

5） NUREG-0050：“Recommendations related to Browns Ferry Fire”, February 1976 http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr0050/

6） 原発の安全上欠陥付・スリーマイル事故の考察，原子力技術研究会

7） TIME：“Pulling the Nuclear Plug”,13. February, 1984 http://content.time.com/time/magazine/article/0,9171,926461,00.html

8）NRC：“REGULATORY GUIDE 1.189 FIRE PROTECTION FOR NUCLEAR POWER PLANTS”, Revision 2, October, 2009 http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0925/ML092580550.pdf

9） OECD/NEA：“OECD Fire Project － Topical Report NO.1, Analysis of High Energy Arcing Fault (HEAF) Fire Events”, NEA/CSNI/R, 25. June, 2013, https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2013/csni-r2013-6.pdf

10）東北電力：女川原子力発電所 1 号機タービン建屋地下 1 階高圧電源盤火災に係る原因と対策について（安全協定に基づく報告事象），平成 23 年 03 月 12 日，https://www.tohoku-epco.co.jp/news/atom/__icsFiles/afieldfile/2011/05/30/ab2.pdf

11）東北電力：東北地方太平洋沖地震およびその後に発生した津波に関する女川原子力発電所の状況について，平成 23 年 05 月，http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/earthquake/files/houkoku230530-2.pdf#search='%E5%A5%B3%E5%B7%9D+3%E6%9C%8811%E6%97%A5+%E7%81%AB%E7%81%BD' ⇒平成 28 年 02 月 24 日にリンク切れ確認（代替ページ発見できず）

12）NRA：高エネルギーアーク損傷（HEAF）に関する安全研究について（トピックス①），平成 27 年 09 月 28 日，https://www.nsr.go.jp/data/000125423.pdf

13） JEAG 4607-2010：原子力発電所の火災防護指針，平成 22 年 03 月，社団法人日本電気協会原子力規格委員会，

14） OECD/NEA：“OECD Fire Project – Topical Report NO.1, Analysis of High Energy Arcing Fault (HEAF) Fire Events”, NEA/CSNI/R, 25. June, 2013,

https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2013/csni-r2013-6.pdf
15）防災行政研究会：火災報告取扱要領ハンドブック，11 訂版，東京法令出版
16）総務省：日本標準産業分類（平成 05 年 10 月改定），大分類 G - 電気・ガス・熱供給・水道業，http://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/index/seido/sangyo/5index.htm
17）総務省：日本標準産業分類（平成 14 年 03 月改定）（平成 20 年 3 月末まで）中・小・細分類項目新旧対照概要表，製造業、電気・ガス・熱供給・水道業，http://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/index/seido/sangyo/5.htm
18）総務省：日本標準産業分類（平成 19 年 11 月改定），F - 電気・ガス・熱供給・水道業，http://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/index/seido/sangyo/19-5.htm
19）総務省：日本標準産業分類（平成 25 年 10 月改定）（平成 26 年 4 月 1 日施行），http://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/index/seido/sangyo/H25index.htm
20）調査実務研究会：火災報告取扱要領のてびき，初版 3 刷，東京法令出版
21）図出典：http://internet.watch.impress.co.jp/img/iw/docs/732/813/html/ntt20.jpg.html

第四章　過電流を模擬したケーブルの燃焼試験

本章は、電力中央研究所による「難燃性動力ケーブルの過電流による燃焼試験」[1)]、および「難燃性低塩酸耐熱ビニルシース製 600V 電力ケーブルの過電流による燃焼試験」[2)]に関する非公刊の報告書（以下、電中研報告）の記載内容に基づいている。したがって、試験の内容については引用した箇所も多いが、それらに個人的な考察や解釈を加筆することで、全体的にまとめ直す形をとった。なお、本章の目的は情報提供を受けた火災実証試験について、その試験結果を把握し、詳細な分析を実施することである。

以降では主に電中研報告の内容に基づく部分を「黒文字」で表記し、筆者が新たに加筆した部分については「黒文字」で表記することで、両者の違いを識別できるよう、工夫した。

４－１　ケーブルの過電流火災実証試験の背景

試験の内容へ入る前に、筆者が理解している範囲内で、実証試験の背景について解説する。原子力施設の火災防護に関しては、2013 年に原子力規制委員会（以下、NRA）が定めた「実用発電用原子炉及びその附属設備の火災防護に係る審査基準」[3)]の中で、従来の深層防護の概念を徹底すべく、①火災の発生防止、②火災の早期感知消火、③火災の影響軽減、という各段階の要件について、それらの全てを満足するよう求められている。つまり、可能な限り燃えにくい材料を使用すること、適切な火災検知設備および火災消火設備を設置すること、重要な系統や機器を適切に分離すること（系統分離）が課されており、特に系統分離の要件については、以下の規制要求が存在する。

① 3 時間以上の耐火能力を有する隔壁等の設置。

② 水平距離を 6m 以上確保、ならびに火災検知設備および自動消火設備の設置（介在可燃物が存在しないこと）。

③ １時間の耐火能力を有する隔壁等ならびに火災検知設備および自動消火設備の設置。

現行の基準では、①から③のいずれかの方法で系統分離を実施すればよいが、②または③の方法を選択する場合は、①の方法に対して分離性能が同等であることを示す必要がある。

これらの系統分離要件については、原点である 10CFR Part50 Appendix R の策定経緯まで遡ってみると、元 NRC 職員が当時を振り返りながら、「水平距離 20 フィート（約 6m）という数値は、元々50 フィートにしたかったが、妥協して 20 フィートとなった。」[4)]、と説明している。したがって、これらの方法の同等性については、米国においても明示されておらず、当時の技術者等による工学的な判断がこれらの根拠であることが伺える。

また実用的な面では、①および②の方法について、特に既存プラントにおいては、追加工事等での対応が難しいため、実質的には③の方法で対策を取らざるを得ない。したがって以降で述べる実証試験は、③の系統分離方法を選択する上で、ケーブルトレイで想定するケーブルの過電流火災へ対する、検知設備および消火設備の性能評価を目的としたものである。

４－２　動力ケーブルの過電流による燃焼試験

本実証試験の目的は、ケーブルの過電流火災へ対して、泡消火設備の有効性を評価することである。したがって、その試験体としては、6.9kV 高圧電力ケーブルおよび 600V 低圧電力ケーブル（共に導体の断面積 100 ㎜²，１心）を選別し、それらを水平または垂直のラダー型ケーブルトレイへ布設した状態で、目標値 2000 アンペアの電流を試験体に印加し、過電流時におけるケーブル火災を模擬している。なお、試験体へ印加する電流値については、過去の知見[5)]に基づき、ケーブルの許容電流値の約 6 倍で設定している。また本実証試験では、ケーブルの発火位置を制御する等の観点から、試験体の周方向へ切込口（高圧：24.7 ㎜，低圧：15 ㎜）を導入する措置が取られている。以下、試験体の構造、ラダー型ケーブルトレイの外観、切込口の導入状況、試験体の敷設状況、および過電流試験の回路図について図示する。

図 68　試験体の構造（6900V 難燃性高圧電力ケーブル）[1)]

図 69　試験体の構造（600V 難燃性高圧電力ケーブル）[2)]

図 70　遮炎シート付ラダー型ケーブルトレイの外観

図 71　切込口の導入状況（高圧：24.7 mm、低圧：15 mm）[1),2)]

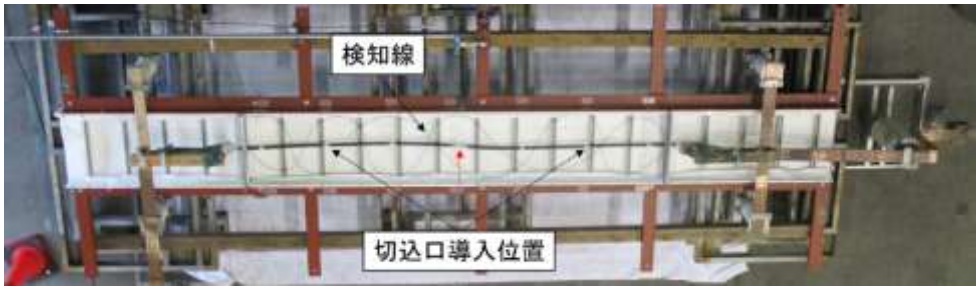


図 72　試験体の敷設状況（水平トレイ試験）

図 73　試験体の敷設状況（垂直トレイ試験）

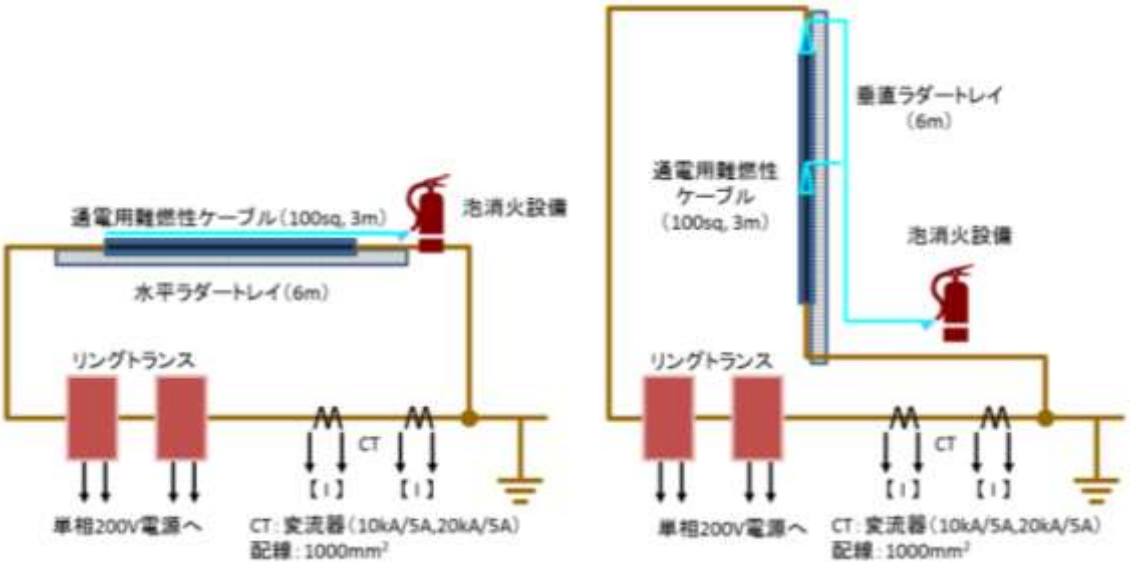


図 74　過電流試験に使用した回路図（左：水平トレイ，右：垂直トレイ）[1),2)]

４－２－１　実証試験の試験条件と測定項目

本実証試験では、試験体への切込口導入数、および試験体の敷設数などをパラメータとしている。表 48 および表 49 へ各試験条件の一覧を示した。

表 48　高圧電力ケーブルの試験条件一覧[1)]

試験名		電流	トレイ姿勢	発火管理位置*	可燃物（ケーブルの敷設数）	トレイ寸法**
過電流ケーブルの発火試験	H01	２０００アンペア目標	水平	切込口１カ所（ケーブル端から 1.5m）	難燃性電力ケーブル***　１本（タツタ電線製 K-1W:6.6kV, 100sq, 1 心）	幅 0.6m 長さ 6m 高さ 0.1m
	H02			切込口３ヵ所（ケーブル端から 0.5, 1.5, 2.5m）		
	V01		垂直	切込口１カ所（ケーブル下端から 0.5m）		
	V02			切込口３ヵ所（ケーブル下端から 0.5, 1.5, 2.5m）		
	H21		水平	切込口１カ所（ケーブル端から 1.5m）	非難燃性電力ケーブル １本(住電日立ケーブル製：6.6kV CV 100sq,1 心)	
	H22			切込口３ヵ所（ケーブル端から 0.5, 1.5, 2.5m）		

過電流ケーブルの消火試験	H11	２０００アンペア目標	水平	切込口１カ所（ケーブル端から1.5m）	難燃性電力ケーブル*** 19本（タツタ電線製 K-1W:6.6kV, 100sq, 1心）	
	H12			切込口３ヵ所（ケーブル端から0.5, 1.5, 2.5m）		
	V11		垂直	切込口１カ所（ケーブル下端から0.5m）		
	V12			切込口３ヵ所（ケーブル下端から0.5, 1.5, 2.5m）		

*　ケーブル外側被覆の周方向に切り込みを入れ、被覆内部で発生するガスを切り込み部へ集中させた。

**　ケーブルトレイ：遮炎シート（シリカクロス）を二重に巻き付けたラダー型トレイ

***　ケーブル有効長：3m

表 49　低圧電力ケーブルの試験条件一覧[2)]

試験名		電流	トレイ姿勢	発火管理位置*	可燃物	トレイ寸法**
過電流ケーブルの発火試験	H31	２０００アンペア目標	水平	切込口１カ所（ケーブル端から1.5m）	難燃性低塩酸耐熱ビニルシース製600V 電力ケーブル*** 1本（フジクラ製 600V FR-CV：100sq, 1心）	幅 0.6m 長さ 6m 高さ 0.1m
	H32			切込口３ヵ所（ケーブル端から0.5, 1.5, 2.5m）		
	V31		垂直	切込口１カ所（ケーブル下端から0.5m）		
	V32			切込口３ヵ所（ケーブル下端から0.5, 1.5, 2.5m）		
過電流ケーブルの消火試験	H33	２０００アンペア目標	水平	切込口１カ所（ケーブル端から1.5m）	難燃性低塩酸耐熱ビニルシース製600V 電力ケーブル*** 26本（フジクラ製 600V FR-CV：100sq, 1心）	
	H34			切込口３ヵ所（ケーブル端から0.5, 1.5, 2.5m）		
	V33		垂直	切込口１カ所（ケーブル下端から0.5m）		
	V34			切込口３ヵ所（ケーブル下端から0.5, 1.5, 2.5m）		

*　ケーブル外側被覆の周方向に切り込みを入れ、被覆内部で発生するガスを切り込み部へ集中させた。

**　ケーブルトレイ：遮炎シート（シリカクロス）を二重に巻き付けたラダー型トレイ

***　ケーブル有効長：3m

なお、過電流ケーブルの消火試験においては、隣接ケーブルへの火災の影響評価を行うため、1 本の通電ケーブルの周りへ高圧ケーブルの場合は 18 本、低圧ケーブルの場合は 25 本の各ケーブルを可燃物として布設し、グループケーブルの状態にし、実証試験を行っている。切込口については、図 71 から図 73 を参照されたい。また実証試験における測定項目は、表 50 および表 51 の通りである。

表 50　高圧電力ケーブル（難燃性）における測定項目 [1)]

測定項目	過電流ケーブルの発火試験						過電流ケーブルの消火試験			
	H01	H02	V01	V02	H21	H22	H11	H12	V11	V12
ケーブル表面温度	7 点	7 点	7 点	7 点	7 点	7 点	13 点	13 点	13 点	13 点
ケーブル切込温度	1 点	3 点	1 点	3 点	1 点	3 点	1 点	3 点	1 点	3 点
ケーブル近傍温度			3 点	3 点				3 点	3 点	3 点
雰囲気温度	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点
発報信号	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点
電流値	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点

表 51　低圧電力ケーブル（難燃性）における測定項目 [2)]

測定項目	過電流ケーブルの発火試験				過電流ケーブルの消火試験			
	H31	H32	V31	V32	H33	H34	V33	V34
ケーブル表面温度	7 点	7 点	7 点	7 点	9 点	13 点	9 点	13 点
ケーブル切込温度	1 点	3 点	1 点	3 点	1 点	3 点	1 点	3 点
ケーブル近傍温度	1 点	3 点	1 点	3 点	1 点	3 点	1 点	3 点
雰囲気温度	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点
発報信号	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点
電流値	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点	1 点

ここで、測定項目のケーブル切込温度とは、ケーブル内部のガス温度のことであり、切込口の内部に挿入した熱電対の出力値である。またケーブル近傍温度とは、切込口（ケーブル表面）から 15 ㎜ほど離れたガスの温度を対象とした熱電対の出力値である、と解釈した（図 75 参照）。

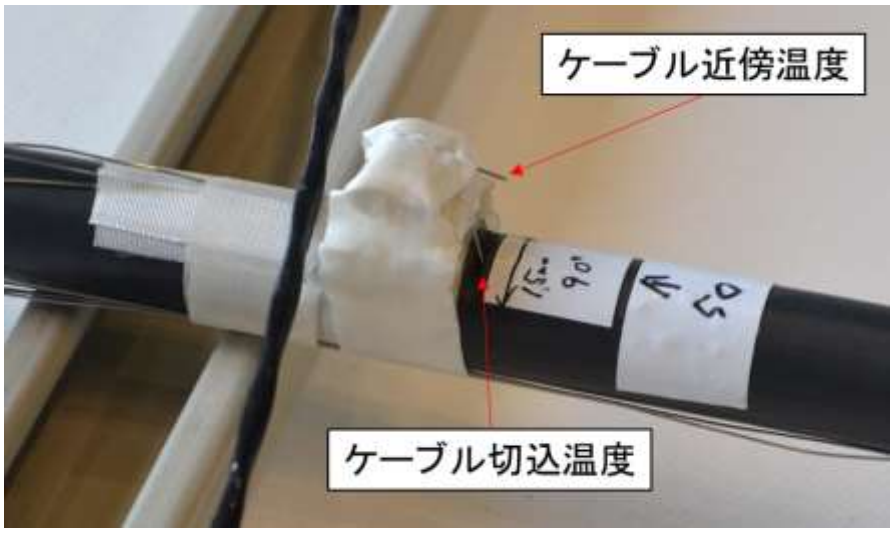


図 75　ケーブル近傍温度とケーブル切込温度の違い

仮に図 75 のような状態で、実験を行っていたとすると、この部分の温度上昇は、随分とこれらの熱電対の設置方法で乱されている可能性も考えられる。

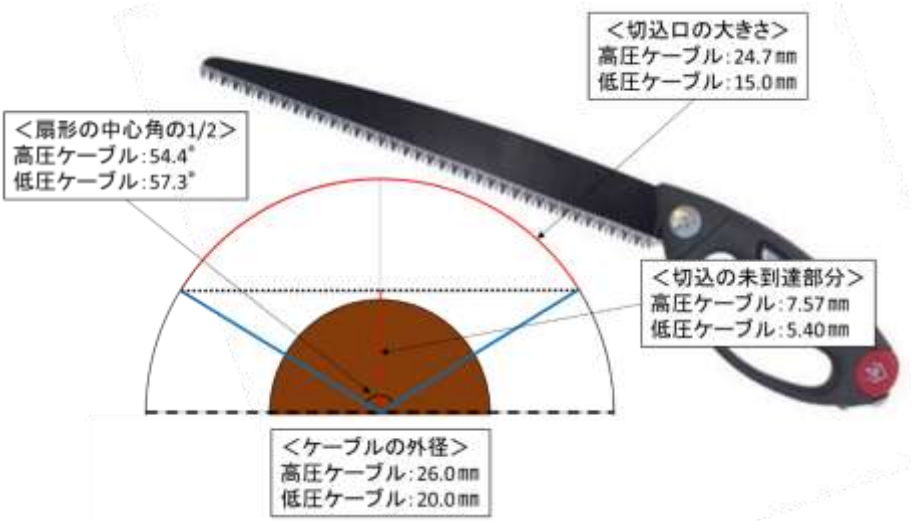


図 76　切込口の導入深さについて

また図 76 へ示したように、高圧ケーブルへ対しては周方向へ 24.7 ㎜、低圧ケーブルの場合は 15 ㎜の切込を導入している。切込未到達部分の長さについては、切込の大きさから高圧ケーブルで 7.57 ㎜、低圧ケーブルで 5.40 ㎜と算出できる。したがって、高圧ケーブルの場合は、導体の半径を 6 ㎜と考えると、切込による損傷を受けていない絶縁体の厚さは 1.57 ㎜、低圧ケーブルの場合は、切込深さが導体にまで到達していることが推定できる。

４－２－２　過電流による動力ケーブルの発火試験

ここでは動力ケーブルを用いた実証試験のうち、発火試験を中心として詳述する。なお、各実証試験の試験結果と全体的な傾向については、以下の通りである。

表 52　高圧電力ケーブル（難燃性）過電流発火試験結果 [1)]

試験名	電流	姿勢	発火管理位置	発火時間	検知時間	通電時間	消火状況
H01	2kA 目標	水平	1 カ所	7 分 45 秒	7 分 48 秒	8 分 02 秒	直ちに消火
H02			3 カ所	7 分 04 秒	7 分 18 秒	7 分 21 秒	直ちに消火
V01		垂直	1 カ所	7 分 05 秒	6 分 25 秒	7 分 19 秒	直ちに消火
V02			3 カ所	6 分 55 秒	6 分 36 秒	7 分 13 秒	直ちに消火

高圧電力ケーブル（難燃性）

表 52 は高圧電力ケーブル（難燃性）を用いた過電流による発火試験の結果を示している。試験 H01 および試験 H02 はケーブルトレイの姿勢が水平であり、試験 V01 および試験 V02 は垂直の試験ケースである。また、ケーブルが発火する位置を制御することを目的として、試験体表面へ約 26 ㎜の切り込みを 1 カ所または 3 カ所に入れている。なお、このような措置は、過電流による発火試験を行うための便宜的なものであることに留意されたい。

まず、試験結果の中でも発火時間について述べてみると、4 ケースのうち多少のズレはあるものの、通電開始から 7 分程度で発火する結果となった。また検知時間については、水平トレイの試験ケースである試験 H01 および試験 H02 の両方で、ケーブルが発火した後に異常の検知がなされている。一方、垂直トレイの試験ケースである試験 V01 および試験 V02 については、発火する前にケーブル温度の異常が検知される結果となった。この点については、切り込み部から噴出するガスが、検知線へ与える影響の程度に依存している、と考えられる。

発火試験時の燃焼性状としては、切り込み部のケーブル表面温度が 200℃から 230℃を超えた辺りで発火し、切り込み部で有炎火災となること、通電を停止して消火措置を行うまでは燃焼が継続されること、燃焼の進展と共にケーブルの外部被覆材の炭化が進行するものの、表面の切り込み部から内部の絶縁体が溶け落ち、ラダー型ケーブルトレイ上で燃焼することが確認されている。

鎮火後のケーブルについては、切り込み部近傍で外部被覆材や内部の絶縁体が著しく溶融・燃焼し、炭化していることが観察されており、切り込み部から 1.0m 離れた位置においても、ケーブル内部の絶縁体の減少が確認されていることから、ケーブル内部で絶縁体がガス化し、切り込み部から放出されたものと考えられる。

表 53　高圧電力ケーブル（非難燃性）過電流発火試験結果 [1)]

試験名	電流	姿勢	発火管理位置	発火時間	検知時間	通電時間	消火状況
H21	2kA 目標	横置き	1 カ所	5 分 56 秒		6 分 12 秒	直ちに消火
H22			3 カ所	5 分 51 秒		6 分 05 秒	直ちに消火

高圧電力ケーブル（非難燃性）

表 53 は高圧電力ケーブル（非難燃性）を用いた過電流による発火試験結果を示している。試験 H21 および試験 H22 はケーブルトレイの姿勢が水平である。また、ケーブルが発火する位置を制御することを目的として、試験体表面へ 24.7 ㎜の切り込みを 1 カ所または 3 カ所に入れている。なお、このような措置は過電流による発火試験を行うための便宜的なものであることに留意されたい。

まず、発火時間については通電開始から 6 分程度で発火する結果となっており、難燃性高圧電力ケーブルと比較して、およそ 1 分早く発火することが確認された。一方、この試験ケースにおいては検知線の設置は行っていないため、あくまで推測の域となるが、検知時間については、難燃性高圧電力ケーブルと同程度であると考えられる。

発火試験時の燃焼性状としては、切り込み部から放出されるガス温度が 200℃を超えた辺りで発火し、切り込み部で有炎火災となること、通電を停止して消火措置を行うまでは燃焼が継続されること、燃焼の進展と共にケーブルの外部被覆材の溶融・炭化が進行し、内部の絶縁体も溶け落ち、ラダー型ケーブルトレイ上で燃焼することが確認されている。

鎮火後のケーブルについては、切り込み部近傍で外部被覆材や内部の絶縁体が著しく溶融・燃焼し、炭化していることが観察されており、比較的原型を保っている位置においても、ケーブル内部の絶縁体の減少が確認されていることから、ケーブル内部で絶縁体がガス化し、切り込み部から放出されたものと考えられる。

表 54　低圧電力ケーブル（難燃性）過電流発火試験結果 [2)]

試験名	電流	姿勢	発火管理位置	発火時間	検知時間	通電時間	消火状況
H31	2kA 目標	水平	1 カ所	7 分 42 秒	5 分 23 秒	7 分 57 秒	直ちに消火
H32			3 カ所	7 分 14 秒	5 分 42 秒	7 分 40 秒	直ちに消火
V31		垂直	1 カ所	7 分 01 秒	5 分 12 秒	7 分 30 秒	直ちに消火
V32			3 カ所	7 分 03 秒	5 分 07 秒	7 分 16 秒	直ちに消火

低圧電力ケーブル（難燃性）

表 54 へは低圧電力ケーブル（難燃性）を用いた過電流による発火試験結果を示している。試験 H31 および試験 H32 はケーブルトレイの姿勢が水平であり、試験 V31 および試験 V32 は垂直の試験である。また、ケーブルが発火する位置を制御することを目的として、試験体表面へ 15 ㎜の切り込みを 1 カ所または 3 カ所に入れている。なお、このような措置は過電

流による発火試験を行うための便宜的なものであることに留意されたい。

まず、試験結果の中でも発火時間について述べてみると、4 ケースのうち多少のズレはあるものの、通電開始から 7 分程度で発火する結果となった。また検知時間については、全てのケースで発火よりも前に、ケーブルの温度異常が検知されており、高圧電力ケーブル（難燃性）のケースとは異なる傾向となった。この点については、各ケーブルの構成材料の寸法に依存していると考えられる。試験体の導体サイズについては、断面積 100 ㎜²（導体の公式外径は 12 ㎜）と等しくなるよう選別しているものの、絶縁体および外部の被覆材であるシースの大きさについては、高圧電力ケーブル（絶縁体 4.0 ㎜、シース 2.1 ㎜、仕上り外径 26 ㎜；タツタ電線製 K-1W については詳細不明のため、住友日立電線 6.6ｋＶ CV ケーブルの値を参考とした）、低圧電力ケーブル（絶縁体 1.5 ㎜、シース 2.0 ㎜、仕上り外径 19～20 ㎜）であり、両者のケーブル外径には 5 ㎜～6 ㎜の差が生じている。そのため、低圧電力ケーブルにおける試験が全てのケースで発火前に温度異常を検知できたのは、試験体の外径が高圧電力ケーブル（難燃性）よりも小さく、内部からの熱がケーブル外部へ伝導するまでの時間が早いことが原因である、と思われる。

発火試験時の燃焼性状としては、通電開始 4～6 分後でケーブルの表面温度が 200℃以上、切り込み部から放出されるガスの温度が 230℃以上に到達し、その後も温度上昇を続け、発火に至ることが確認された。なお、高圧電力ケーブル（難燃性）の試験では、ケーブルの表面温度が 200℃から 230℃に到達し、発火に至るというような傾向があったが、低圧電力ケーブル（難燃性）における試験では、そのような傾向は確認されなかった。また燃焼の規模について、高圧電力ケーブル（難燃性）では、切り込み部近傍へ燃焼が集中していたことに対して、低圧電力ケーブル（難燃性）では、切り込み部に関係なく、ケーブルの全長にわたって燃焼し、導体が一部露出するまで被覆材が激しく燃焼したことが確認された。

鎮火後のケーブルについては、切り込み部近傍を含め、ケーブルの全長にわたって絶縁体の溶融・燃焼、炭化が確認されており、ケーブルの導体が一部露出するまで、著しく燃焼したことが観察により報告されている。

ここまでは発火試験の概要を述べてきたが、以降では各試験の結果について、詳細に述べることにする。

４－２－２－１　試験 H01（難燃性高圧電力ケーブル，切込１カ所，水平）

ここで詳述する試験 H01 は、難燃性高圧電力ケーブルを用いた燃焼試験である。なお、切込導入数は１カ所（1500 ㎜）、トレイ姿勢は水平であり、ケーブルが発火した後の消火方法は、CO2 消火器による手動消火を実施している。試験 H01 における温度測定点については、以下に一覧として整理する。

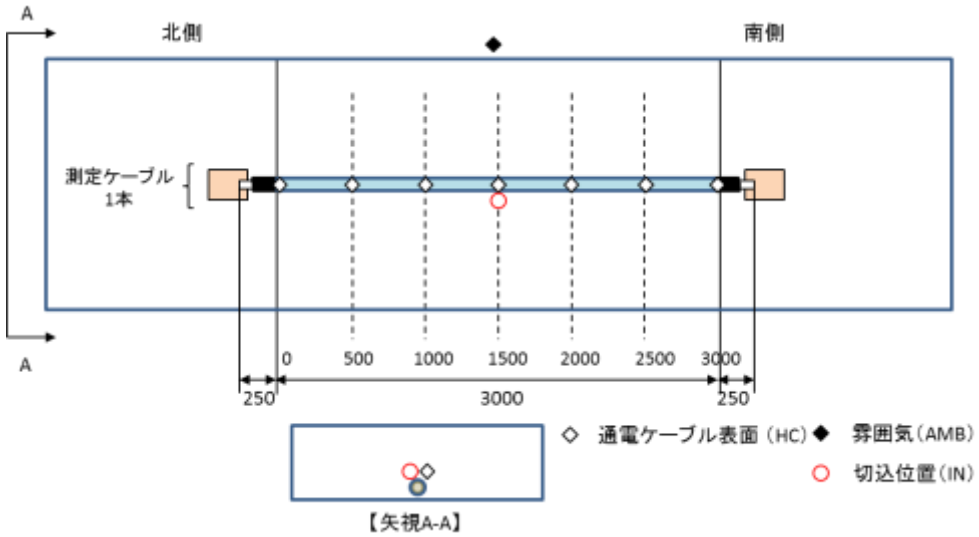


図 77　試験 H01 における温度測定点（数値単位：mm）[1)]

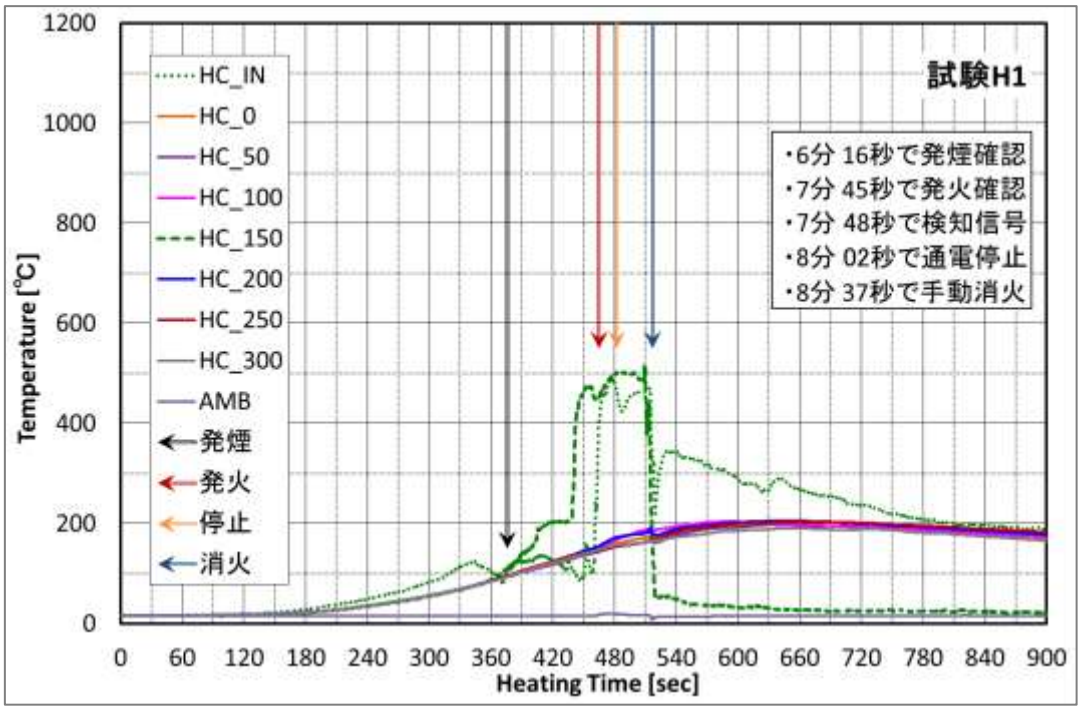


図 78　試験 H01 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[1)]

表 55　試験 H01 の燃焼性状（試験開始 6 分 16 秒～8 分 26 秒）[1)]

図 78 には試験 H01 における温度測定点の測定結果を示している。なお、同じ測定位置におけるケーブルの切込部温度（HC_IN（150））とケーブルの表面温度（HC）については、同色を用いて整理することにした。

HC_IN へ着目すると、試験時間 120 秒～345 秒ごろまでの間に、他と比べて測定温度が上昇していることが見て取れる。その後、345 秒ごろをピークとして 376 秒にかけて温度が低下し、376 秒に「パンッ」という大きな破裂音に伴い、ケーブルの発煙が確認されている。この試験時間 345 秒から 376 秒における温度低下については、ケーブル両端からのガスの放出による内部圧力の低下によって生じていると考えられる。また試験時間 376 秒から 420 秒にかけては、ケーブルの表面温度と類似した上昇傾向を示している。試験時間 420 秒以降では温度が再び低下し、450 秒には 90℃前後、ケーブル測定位置 150 が発火した 465 秒では、409℃まで到達している。この点については、発火の影響を受けているものと考えられる。また試験時間 450 秒の温度低下については、原因不明であるが、切込部からのガス噴出速度が著しいため、対流による失熱の影響を受けている可能性も否定できない。加えて、発火前後の温度上昇と消火前後の温度低下が著しく、消火後もガスの放出が観察されていることから、HC_IN については、ケーブル内部の発生ガス温度を測定できているものと考えられる。

一方、ケーブル表面へ設置した HC の温度については、切込部である HC_150 とそれ以外の測定位置で温度の上昇傾向へ二極化が見られる。

まず HC_150 に着目すると、試験開始から 360 秒にかけては、他の測定位置と同様の温

度上昇を示している。試験時間 360 秒以降では徐々に温度が上昇し、376 秒のシースの破裂に伴い、温度が急上昇している。試験時間 420 秒ごろには 202℃まで到達し、その後 10 秒ほど一定の温度を示している。この点については、ケーブルシースの融点に依存していると思われる。その後、試験時間 432 秒から 450 秒ごろにかけて、温度が急上昇し、その温度は 472℃まで到達している。この約 20 秒間における急激な温度上昇は、固体の温度上昇として考え難いことから、試験時間 432 秒の時点でガスの噴出やシースの破裂等の影響で、ケーブル表面と熱電対の接触にズレが生じ、ケーブル近傍ガスの温度を測定しているものと考えられる。またこの点については、消火後の温度低下が著しく、その後の測定値も雰囲気温度に近い値であることからも推測できる。なお、発火時間 465 秒の温度は 450℃となっており、517 秒の手動消火後もガスの放出が観察されている。

切込位置である HC_150 以外の HC_0、HC_50、HC_100、HC_200、HC_250、HC_300 については、試験開始から終了にかけて同様の温度上昇を示しており、そのピーク値は 203℃まで到達している。したがって、これらの測定位置については、ケーブル表面の温度を測定できているものと考えられる。また発火に伴う急激な温度上昇が見られないことから、固体への火炎の伝播はなく、発生ガスに依存した燃焼性状を示していると考えられる。

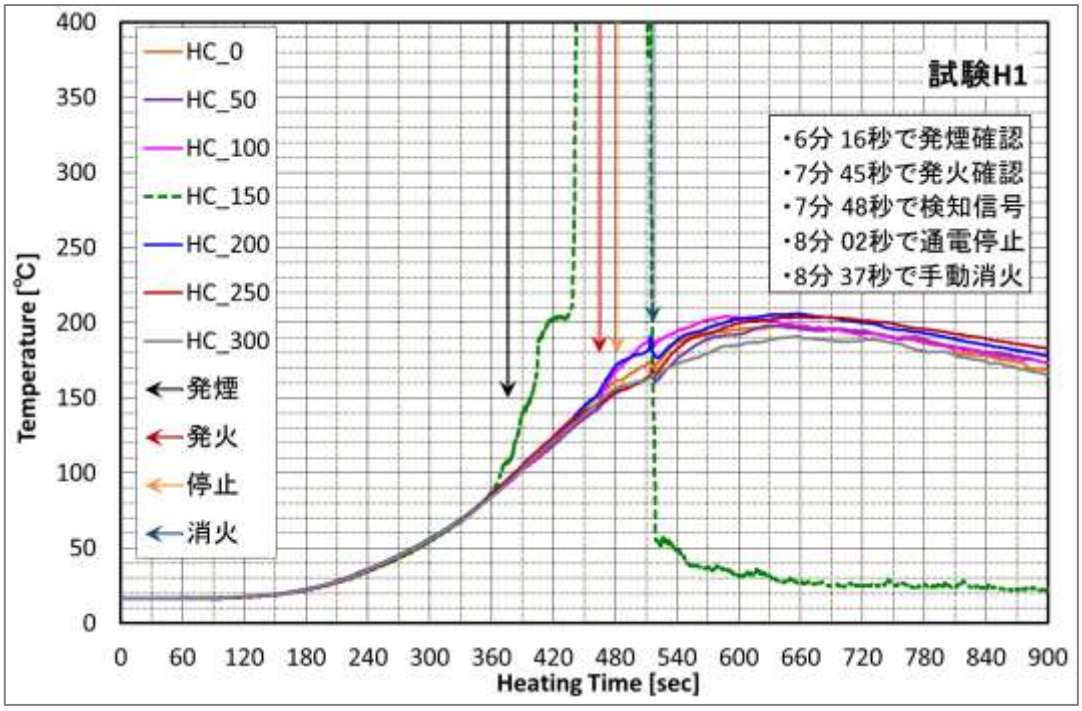


図 79　試験 H01 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm）[1)]

試験 H01 におけるケーブルの燃焼性状を以下の通りに整理する。

- 試験時間 376 秒ごろ、「パンッ」という大きな破裂音に伴い、ケーブルの発煙（内部発生ガスの放出）を確認した。
- その後、発生ガスの噴出速度が増大し、試験時間 465 秒（測定位置 150）でケーブルの発火を確認した。なお、試験時の発火機構については、発火時の測定温度（HC_IN と HC_150）が 409℃から 457℃の範囲であることから、発生ガスの自己発火であると考えられ、これは発生ガスの濃度に依存していると思われる。
- ケーブル発火後の試験時間 482 秒に通電を停止したところ、乱流火炎の連続火炎高さが徐々に低下することを確認した。
- ケーブル通電の停止後も発生ガスが放出され、すぐには火炎が鎮火しないことを確認した。

４－２－２－２　試験 H02（難燃性高圧電力ケーブル，切込 3 カ所，水平）

ここで詳述する試験 H02 は、難燃性高圧電力ケーブルを用いた燃焼試験である。なお、切込導入数は 3 カ所（500 ㎜、1500 ㎜、2500 ㎜）、トレイ姿勢は水平であり、ケーブルが発火した後の消火方法は、CO2 消火器による手動消火を実施している。試験 H02 における温度測定点については、以下に一覧として整理する。

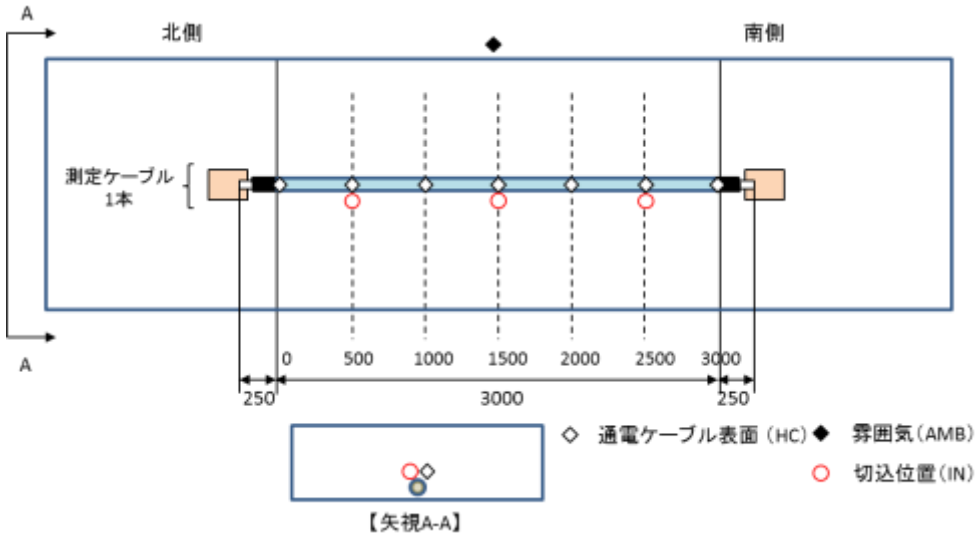


図 80　試験 H02 における温度測定点（数値単位：mm）[1)]

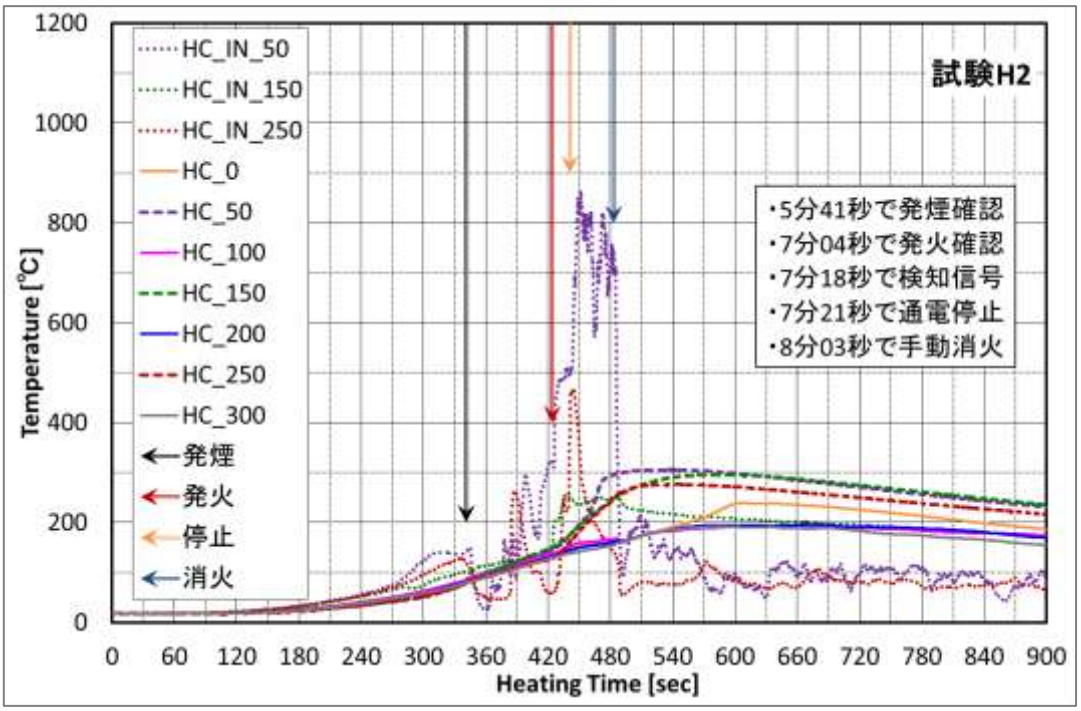


図 81　試験 H02 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[1)]

表 56　試験 H02 の燃焼性状（試験開始 5 分 45 秒～7 分 41 秒）[1)]

表 57　試験 H02 の発火状況（発火位置：ケーブル測定位置 50）[1)]

図 81 には試験 H02 における温度測定点の測定結果を示している。なお、同じ測定位置におけるケーブルの切込部温度（HC_IN）とケーブルの表面温度（HC）については、同色を用いて整理することにした。

図 81 の HC_IN_50、HC_IN_150、および HC_IN_250 へ着目すると、試験時間 180 秒～340 秒ごろまでの間に、他と比べて測定温度が上昇していることが見て取れる。その後、342 秒ごろから 345 秒にかけて、「パンッ」という大きな破裂音に伴い、ケーブルの発煙が HC_IN_50、HC_IN_150、HC_IN_250 のそれぞれで確認されている。したがって、試験時間 360 秒の時点でケーブル内部圧力の低下により、HC_IN_50 と HC_IN_250 の温度が 50℃以下まで低下している。それ以降は両者の温度が再び上昇し、390 秒には 250℃前後、ケーブル測定位置 50 が発火した 424 秒では、HC_IN_50 の測定温度が 316℃まで到達している。その約 2 秒後にはケーブル測定位置 150 が発火し、HC_IN_150 の温度は 206℃を測定している。なお、ケーブル測定位置 250 について発火は確認されなかった。この点につ

いては、441 秒の通電停止に伴い、464℃から急激に温度が低下していることから、ケーブル内部の発生ガス温度を測定できているものと考えるが、発生ガスに含まれていた可燃性ガスの濃度が、その燃焼限界へ到達しなかったことが原因の 1 つとして考えられる。このような傾向は、HC_IN_50 とは異なっているが、483 秒に手動消火の影響を受け、その温度が急激に低下しているため、HC_IN_250 と同様にケーブル内部の発生ガス温度を測定できているものと推測される。

一方、HC_IN_150 については、測定位置 50 と 250 と比べて、明らかに異なった温度の上昇履歴を示している。340 秒ごろのケーブル外装が破裂した際には、HC_IN_50 と HC_IN_250 の温度が極端に低下していたが、HC_IN_150 については、そのような変動が見られない。また測定位置 150 が発火した試験時間 427 秒において、その温度は 206℃にまで到達しているが、483 秒の手動消火の際には、消火による影響を受けていない。以上のことから HC_IN_150 については、ケーブル外装の溶融部へ埋没し、ケーブル構成材料と同化していた可能性が考えられる。

また HC_50、HC_150、HC_250 については、ケーブルの発火に伴う急激な温度上昇を確認することができる。したがって、これらについても構成材料の相変化に伴い、熱電対が徐々に埋没していき、ケーブル構成材料と同化した可能性が考えられる。その他、HC_0、HC_100、HC_200、HC_300 については、互いに類似した温度上昇履歴を示しているが、HC_0 についてのみ、試験時間 540 秒から 600 秒の間に、50℃程度の温度上昇が生じている。この点について原因は不明であるが、ケーブル外装の溶融に伴う埋没、または周囲の境界条件の変化が考えられる。

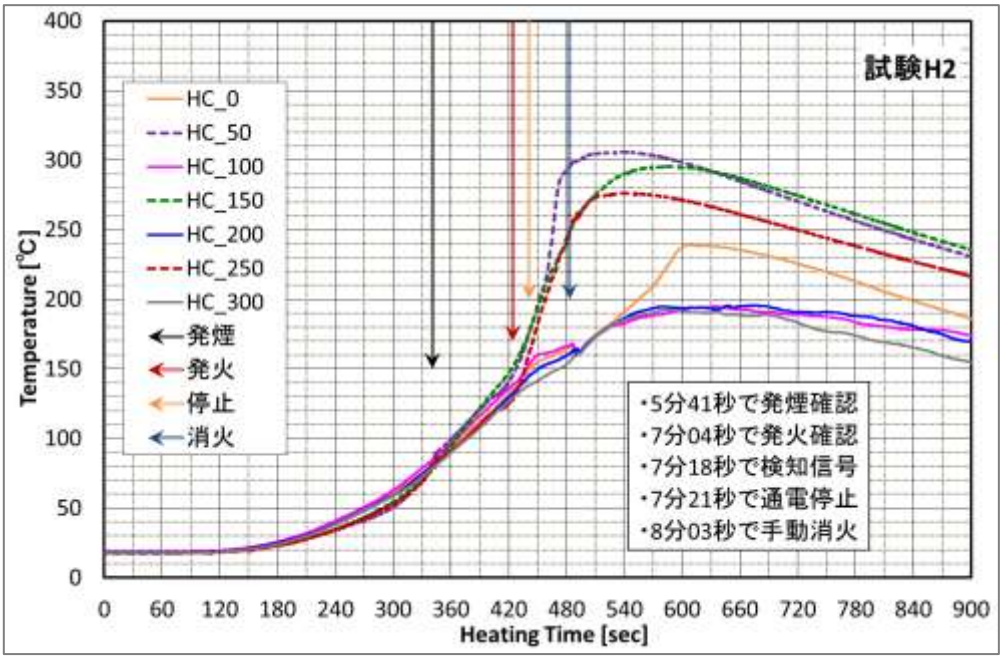


図 82　試験 H02 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm）[1)]

試験 H02 におけるケーブルの燃焼性状を以下の通りに整理する。

- 試験時間 340 秒ごろ、「パンッ」という大きな破裂音に伴い、ケーブルの発煙（内部発生ガスの放出）を確認した。
- その後、発生ガスの噴出速度が増大し、試験時間 424 秒（測定位置 50）および 427 秒（測定位置 150）でケーブルの発火を確認した。なお、試験時の発火機構については、発火時の測定温度が 206℃から 316℃の範囲であることから、発生ガスの自己発火であると考えられる。
- ケーブル発火後の試験時間 441 秒に通電を停止したところ、乱流火炎の連続火炎高さが急激に低下することを確認した。
- ケーブル通電の停止後も発生ガスが放出され、すぐには火炎が鎮火しないことを確認した。

４－２－２－３　試験 V01（難燃性高圧電力ケーブル，切込１カ所，垂直）

ここで詳述する試験 V01 は、難燃性高圧電力ケーブルを用いた燃焼試験である。なお、切込導入数は１カ所（500 ㎜）、トレイ姿勢は垂直であり、ケーブルが発火した後の消火方法は、CO2 消火器による手動消火を実施している。試験 V01 における温度測定点については、以下に一覧として整理する。

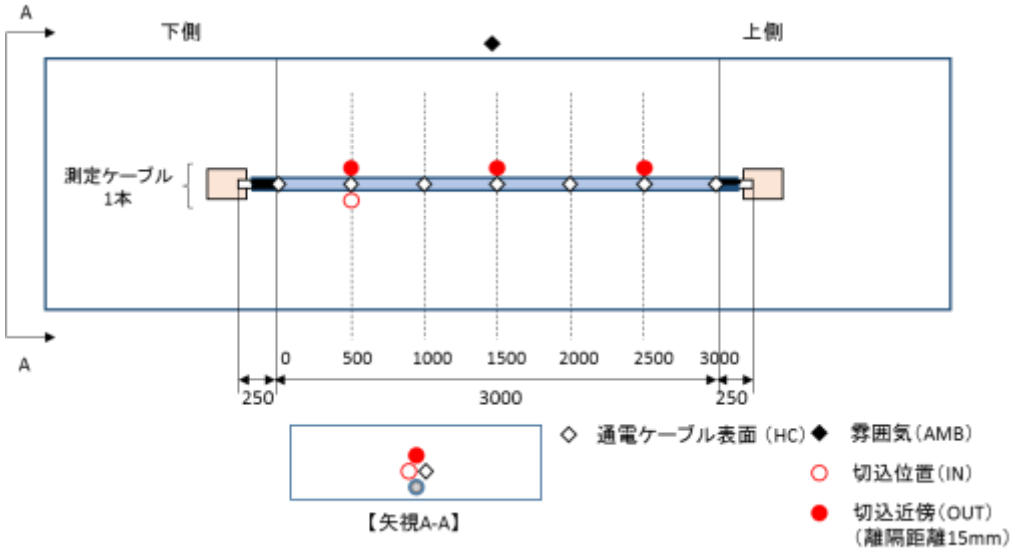


図 83　試験 V01 における温度測定点（数値単位：mm）[2)]

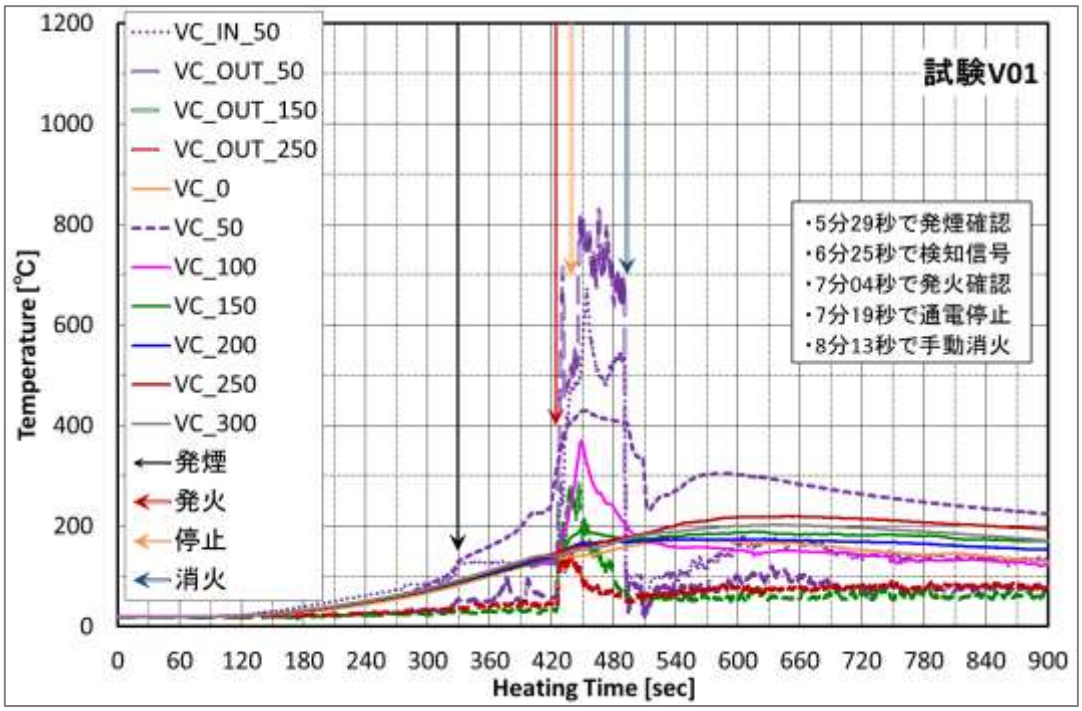


図 84　試験 V01 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[1)]

表 58　試験 V01 の燃焼性状（試験開始 5 分 29 秒～7 分 45 秒）[1)]

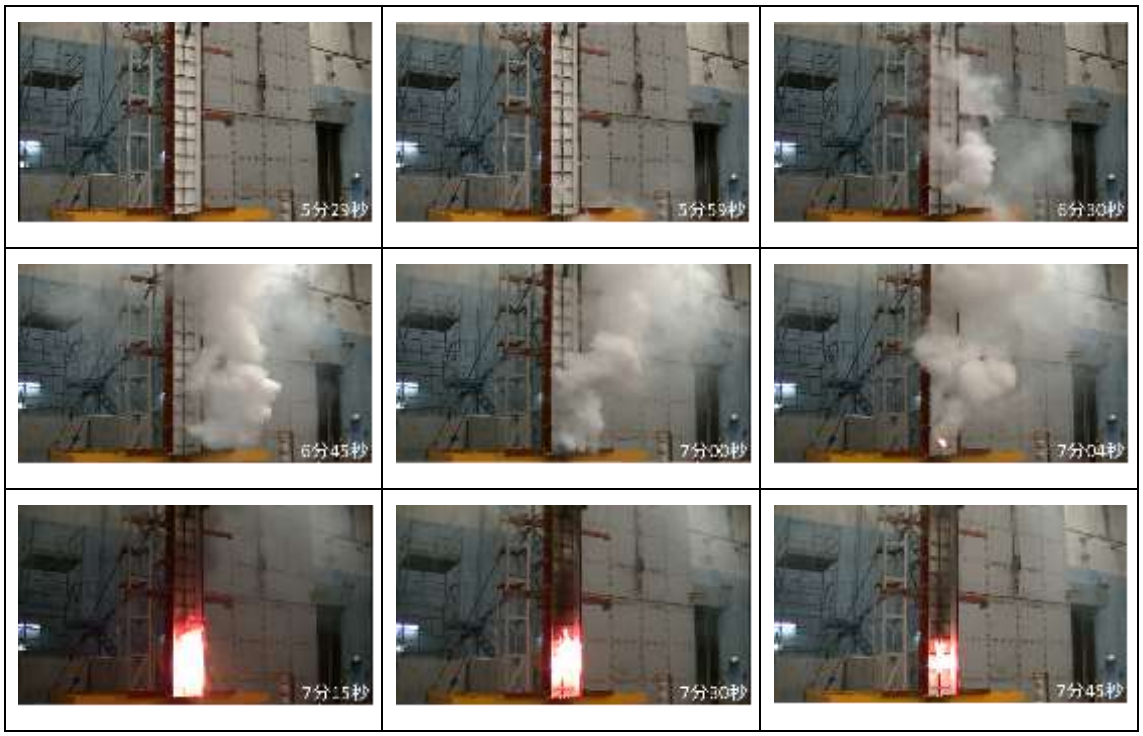


図 84 には試験 V01 における温度測定点の測定結果を示している。なお、同じ測定位置におけるケーブルの切込部温度（VC_IN）とケーブルの近傍空気温（VC_OUT）ケーブルの表面温度（VC）については、同色を用いて整理することにした。

各測定点の温度上昇については、大きく 2 つの傾向に大別することができる。ここではケーブルの切込部温度（VC_IN）、ケーブルの近傍空気温度（VC_OUT）、ケーブルの表面温度（VC_50、VC_100）に着目すると、試験開始から 424 秒後のケーブル発火に伴い、温度の測定値は上昇していることが見て取れる。その中でも VC_50 については、試験時間 300 秒ごろから他の測定点と比較して、温度が上昇し始めており、試験時間 329 秒の発煙時には 130℃、試験時間 424 秒の発火時には 304℃まで到達している。

一方、VC_OUT については、発火に伴う温度上昇が著しく、発火からの 4 秒間で 59℃から 468℃まで温度上昇している。なお、VC_IN についても同様の傾向があり、発火からの 4 秒間でその温度は 127℃から 233℃まで上昇している。

またその他の測定点については、試験開始以降、緩やかな温度上昇がみられ、火炎近傍以外では、発火の影響を受けていないことが理解できる。

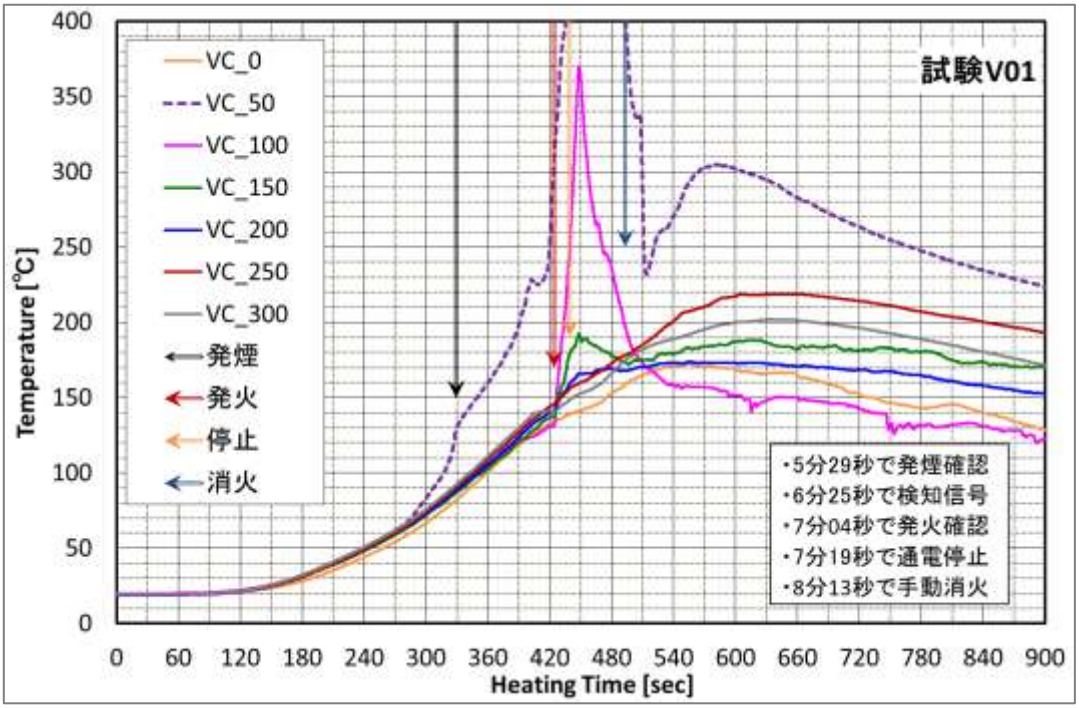


図 85　試験 V01 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm）[1)]

試験 V01 におけるケーブルの燃焼性状を以下の通りに整理する。

- 試験時間 329 秒ごろ、「パンッ」という大きな破裂音に伴い、ケーブルの発煙（内部発生ガスの放出）を確認した。
- その後、発生ガスの噴出速度が増大し、試験時間 424 秒（測定位置 50）でケーブルの発火を確認した。なお、試験時の発火機構については、発火時の測定温度（HC_IN_50、HC_OUT_50、HC_50）が 59℃から 468℃の範囲であることから、発生ガスの自己発火であると考えられ、これは発生ガスの濃度に依存していると思われる。
- ケーブル発火後の試験時間 439 秒に通電を停止したところ、乱流火炎の連続火炎高さが徐々に低下することを確認した。
- ケーブル通電の停止後も発生ガスが放出され、すぐには火炎が鎮火しないことを確認した。

４－２－２－４　試験 V02（難燃性高圧電力ケーブル，切込 3 カ所，垂直）

ここで詳述する試験 V02 は、難燃性高圧電力ケーブルを用いた燃焼試験である。なお、切込導入数は 3 カ所（500 ㎜、1500 ㎜、2500 ㎜）、トレイ姿勢は垂直であり、ケーブルが発火した後の消火方法は、CO2 消火器による手動消火を実施している。試験 V02 における温度測定点については、以下に一覧として整理する。

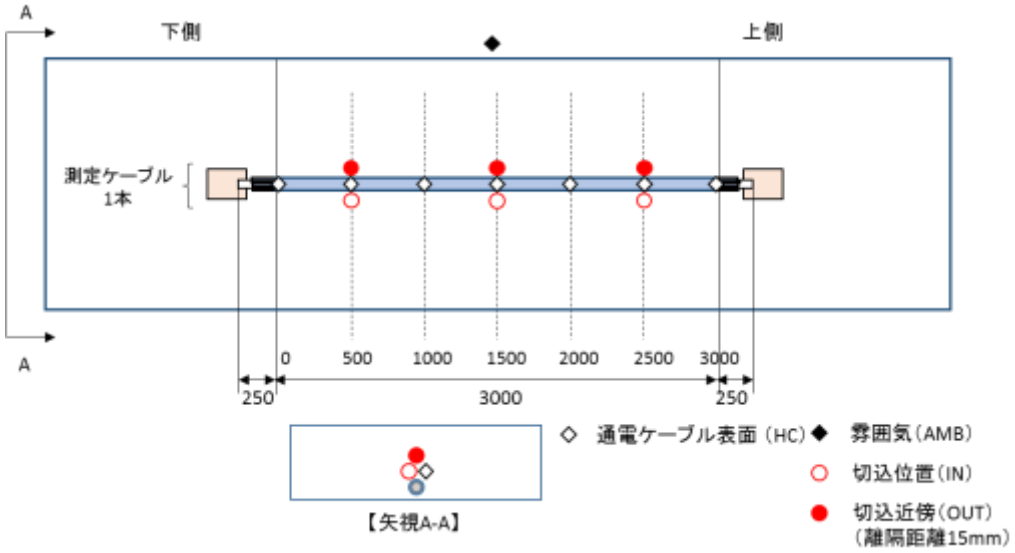


図 86　試験 V02 における温度測定点（数値単位：mm）[1)]

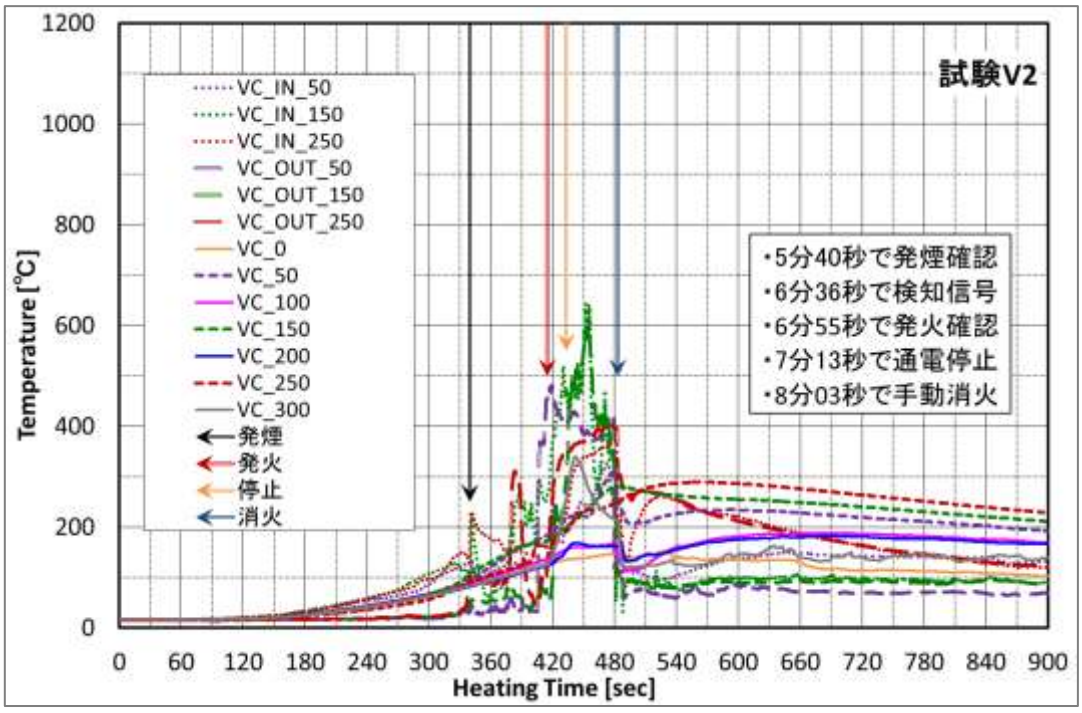


図 87　試験 V02 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[1)]

表 59　試験 V02 の燃焼性状（試験開始 5 分 40 秒～7 分 45 秒）[1)]

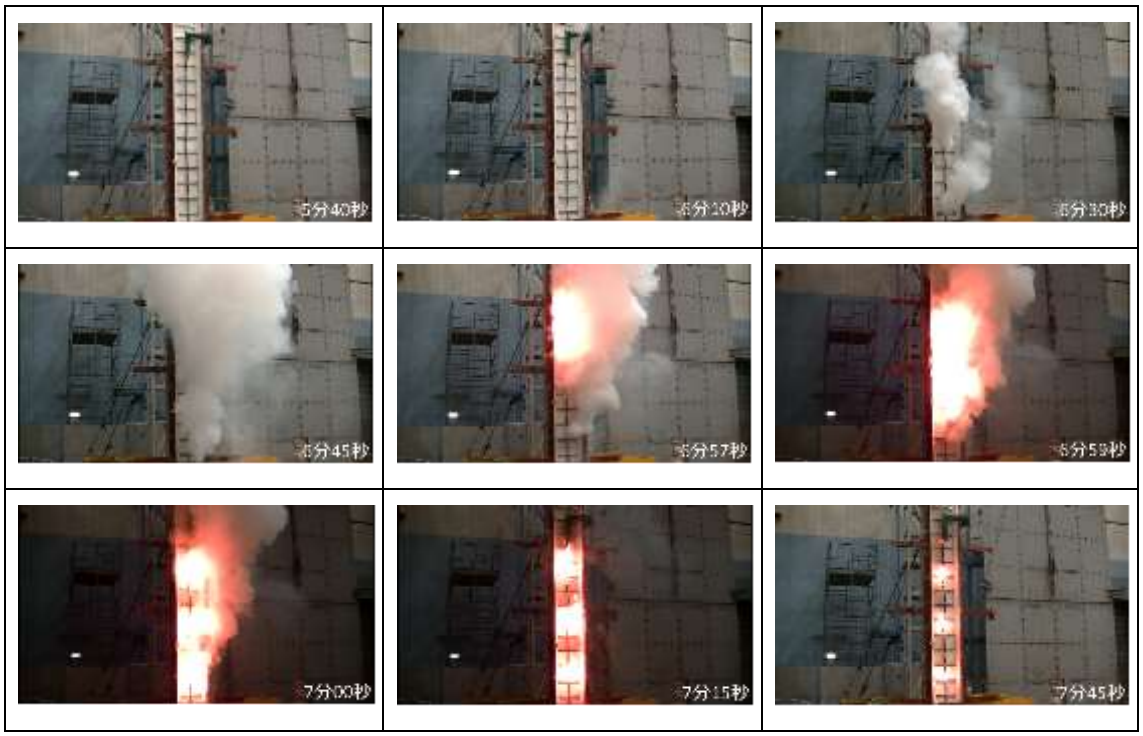


図 87 には試験 V02 における温度測定点の測定結果を示している。なお、同じ測定位置におけるケーブルの切込部温度（VC_IN）とケーブルの近傍空気温（VC_OUT）ケーブルの表面温度（VC）については、同色を用いて整理することにした。

ここではケーブルの切込部温度（VC_IN）、ケーブルの近傍空気温度（VC_OUT）に着目すると、試験時間 340 秒の発煙時における温度は、VC_IN が 109℃から 205℃、VC_OUT が 32℃から 49℃の範囲を示している。また試験時間 415 秒の発火時においては、VC_IN が 135℃から 262℃、VC_OUT が 66℃から 462℃の範囲の温度となっている。

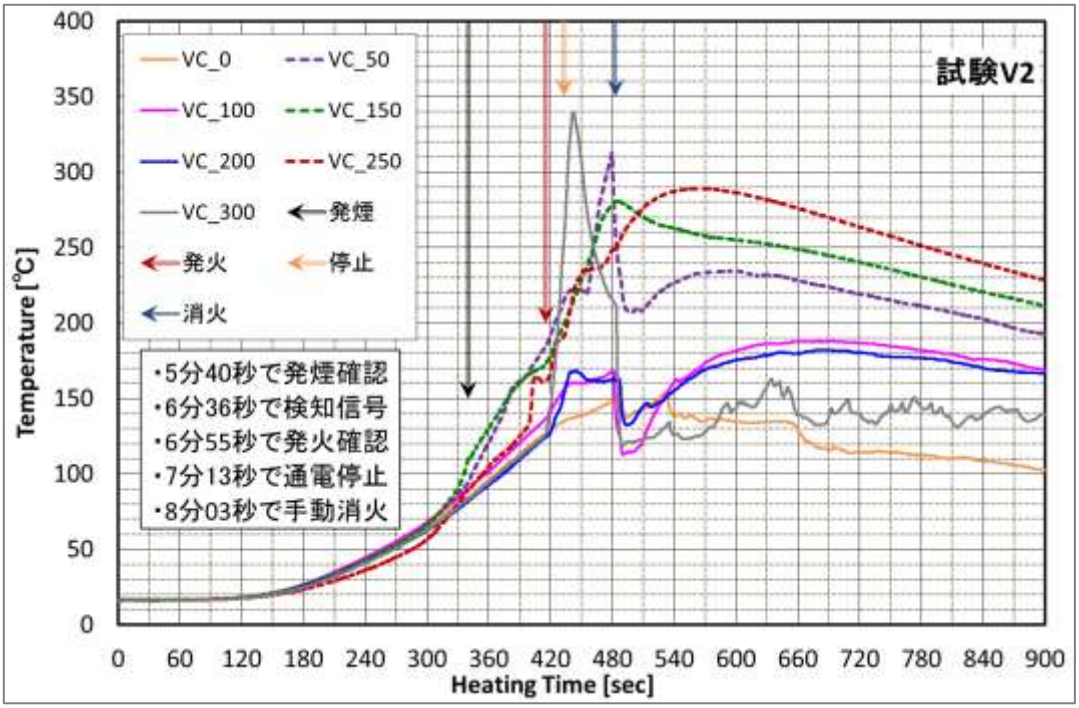


図 88　試験 V02 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm）[1)]

試験 V02 におけるケーブルの燃焼性状を以下の通りに整理する。

- 試験時間 340 秒ごろ、「パンッ」という大きな破裂音に伴い、ケーブルの発煙（内部発生ガスの放出）を確認した。
- その後、発生ガスの噴出速度が増大し、試験時間 415 秒から 420 秒ごろにかけて、ケーブルの発火を確認した。なお、試験時の発火機構については、発火時の測定温度が 66℃から 462℃の範囲であることから、発生ガスの自己発火であると考えられ、これは発生ガスの濃度に依存していると思われる。
- ケーブル発火後の試験時間 433 秒に通電を停止したところ、乱流火炎の連続火炎高さが徐々に低下することを確認した。
- ケーブル通電の停止後も発生ガスが放出され、火炎が鎮火しないことを確認した。

４－２－２－５　試験 H21（非難燃性高圧電力ケーブル，切込１カ所，水平）

ここで詳述する試験 H21 は、難燃性高圧電力ケーブルを用いた燃焼試験である。なお、切込導入数は１カ所（1500 ㎜）、トレイ姿勢は水平であり、ケーブルが発火した後の消火方法は、CO2 消火器による手動消火を実施している。試験 H21 における温度測定点については、以下に一覧として整理する。

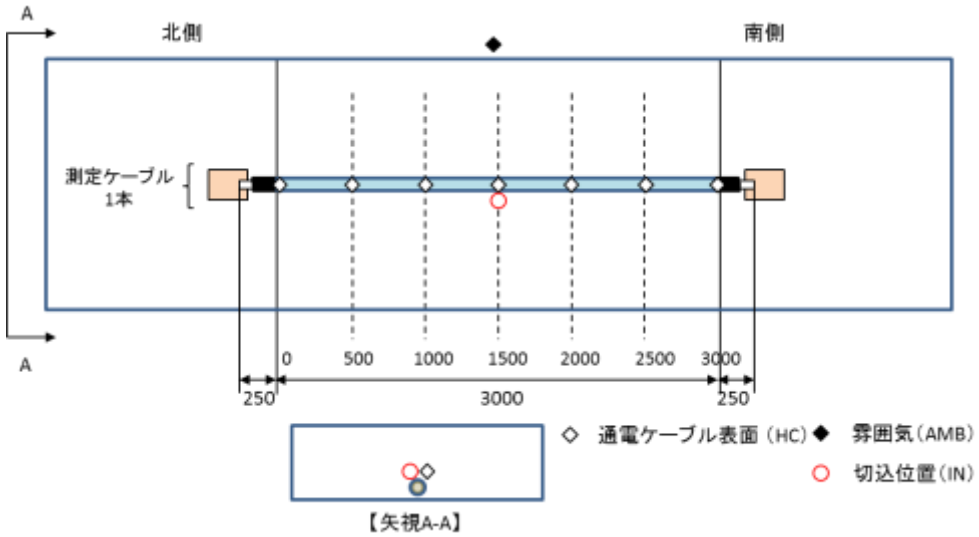


図 89　試験 H21 における温度測定点（数値単位：mm）[1)]

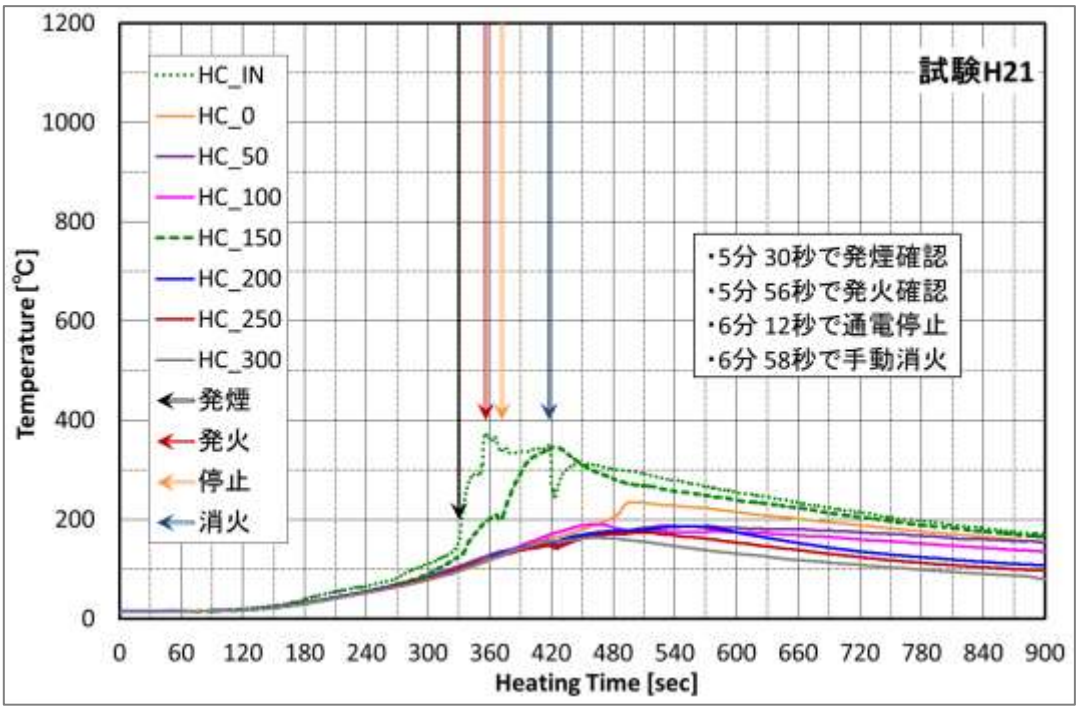


図 90　試験 H21 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[1)]

表 60　試験 H21 の燃焼性状（試験開始 5 分 30 秒～6 分 45 秒）[1)]

図 90 には試験 H21 における温度測定点の測定結果を示している。なお、同じ測定位置におけるケーブルの切込部温度（HC_IN）とケーブルの表面温度（HC）については、同色を用いて整理することにした。

HC_IN（150）、HC_150 に着目すると、試験時間 330 秒の発煙に伴い、温度が上昇し始めていることがわかる。なお、HC_IN（150）については、その後も温度が上昇し、試験時間 356 秒の発火時には、373℃まで到達している。したがって、そのケーブル発火に伴い、HC_150 も温度が 350℃程度まで上昇している。

またその他の温度測定点については、それぞれ同様の傾向を示している。

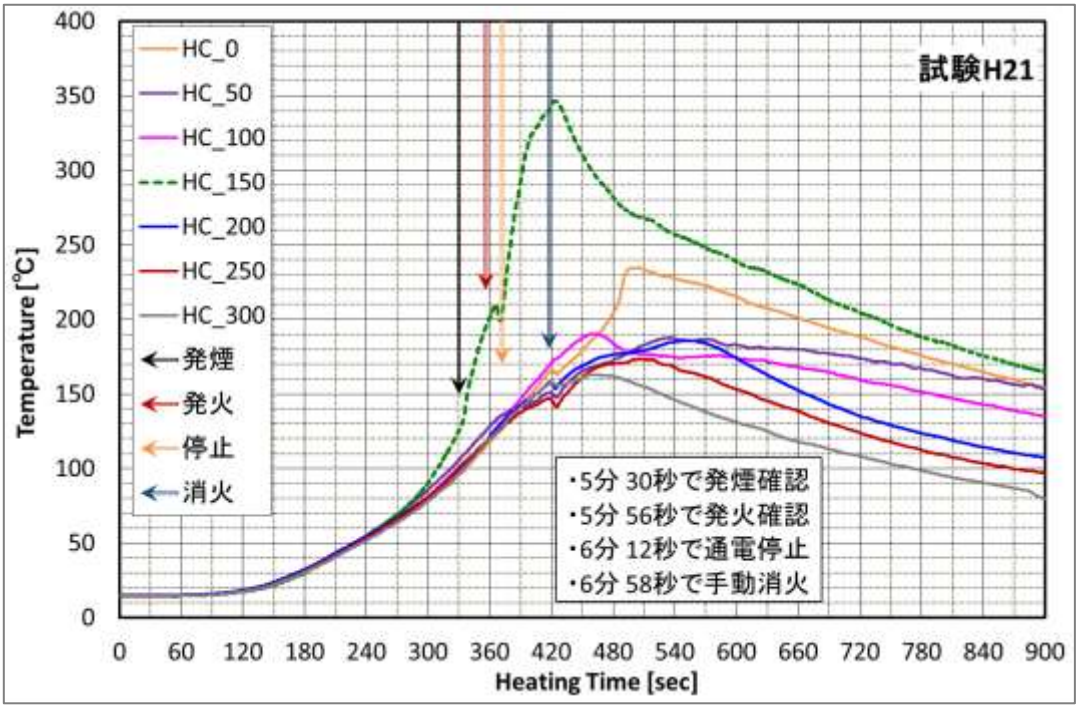


図 91　試験 H21 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm）[1)]

試験 H21 におけるケーブルの燃焼性状を以下の通りに整理する。

- 試験時間 330 秒ごろに、ケーブルの発煙（内部発生ガスの放出）を確認した。
- その後、発生ガスの噴出速度が増大し、試験時間 356 秒（測定位置 150）でケーブルの発火を確認した。なお、試験時の発火機構については、発火時の測定温度が 373℃であることから、発生ガスの自己発火であると考えられる。
- ケーブル発火後の試験時間 372 秒に通電を停止したところ、乱流火炎の連続火炎高さが急激に低下することを確認した。
- ケーブル通電の停止後も発生ガスが放出され、すぐには火炎が鎮火しないことを確認した。

４－２－２－６　試験 H22（非難燃性高圧電力ケーブル，切込 3 カ所，水平）

ここで詳述する試験 H22 は、非難燃性高圧電力ケーブルを用いた燃焼試験である。なお、切込導入数は 3 カ所（500 ㎜、1500 ㎜、2500 ㎜）、トレイ姿勢は水平であり、ケーブルが発火した後の消火方法は、CO2 消火器による手動消火を実施している。試験 H22 における温度測定点については、以下に一覧として整理する。

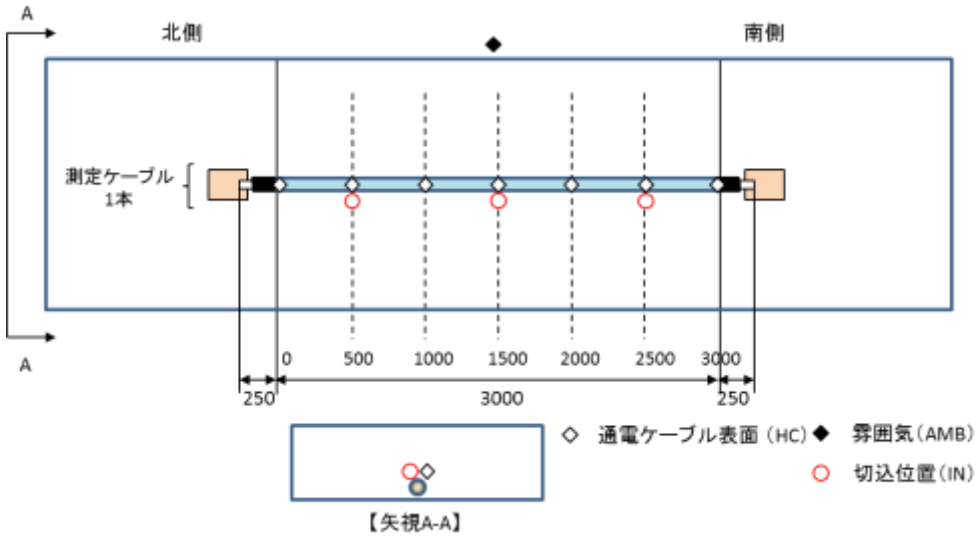


図 92　試験 H22 における温度測定点（数値単位：mm）[1)]

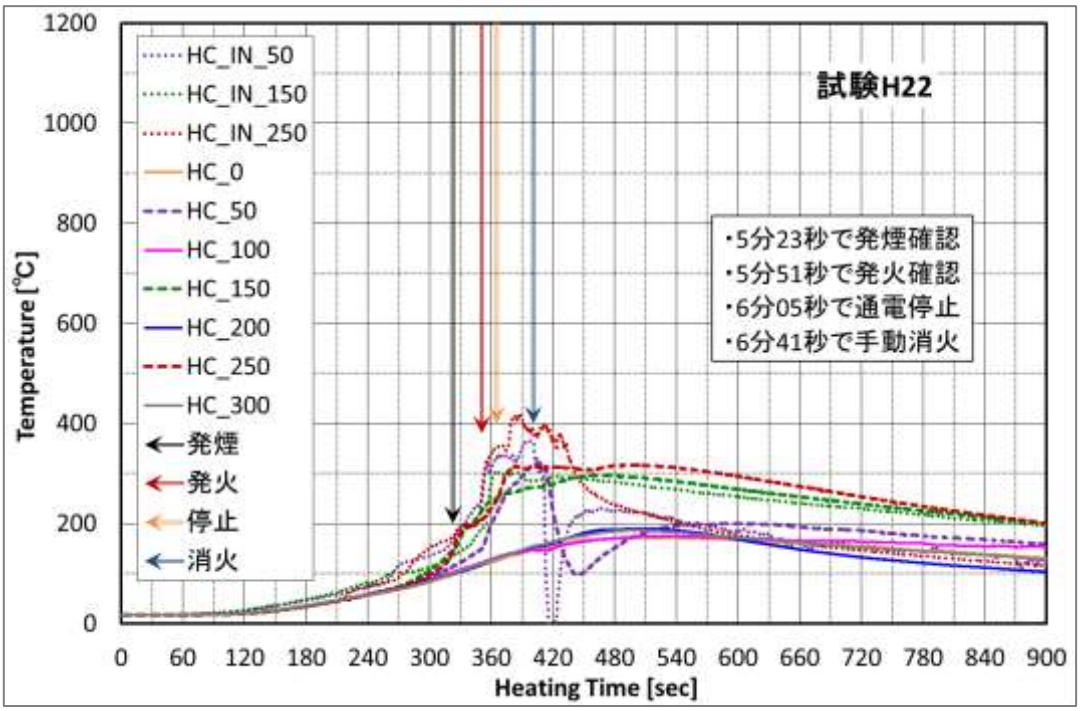


図 93　試験 H22 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[1)]

表 61　試験 H22 の燃焼性状（試験開始 5 分 30 秒～6 分 25 秒）[1)]

図 93 には試験 H22 における温度測定点の測定結果を示している。なお、同じ測定位置におけるケーブルの切込部温度（HC_IN）、およびケーブルの表面温度（HC）については、同色を用いて整理することにした。

はじめに図 93 に示した HC_IN_50、HC_IN_150、HC_IN_250 へ着目すると、発火時間 351 秒までの温度上昇については、同様の傾向を示していることが見て取れる。またケーブルの測定位置 50 では試験時間の 351 秒、ケーブルの測定位置 250 では試験時間の 361 秒、ケーブルの測定位置 150 では試験時間の 368 秒でそれぞれ発火しており、その際の測定温度（HC_IN）は 243℃から 344℃の間で変動している。また HC_IN_50 と HC_IN_250 については、発火直後に温度が急激に上昇しており、試験時間 401 秒の手動消火による影響も確認できることから、各測定点のガス温度を測定できていたものと考える。また HC_IN_150 については、発火後の手動消火による影響を受けず、通電停止後の温度低下も緩やかであることから、燃焼によるケーブルシースの溶融に伴い、絶縁体と同化した可能性がある。以上のことから、試験 H22 におけるケーブルの発火メカニズムは、発生ガスの自己発火（Self Ignition）であると思われる。

次にケーブルの表面温度（HC）について注目すると、切込位置の HC_50、HC_150、HC_250 とそれ以外の HC_0、HC_100、HC_200、HC_300 で温度上昇の傾向が異なっていることがわかる。特に HC_50 については、発火の直後に測定温度が上昇し、試験時間 401 秒の手動消火による影響を受け、100℃程度まで低下しているものの、その後、温度が再上昇している。この点については原因不明であるが、養生テープ（恐らく不燃性）が関係して

いる、もしくはケーブルの外装ではなく、ガスの温度を測定していた可能性がある。

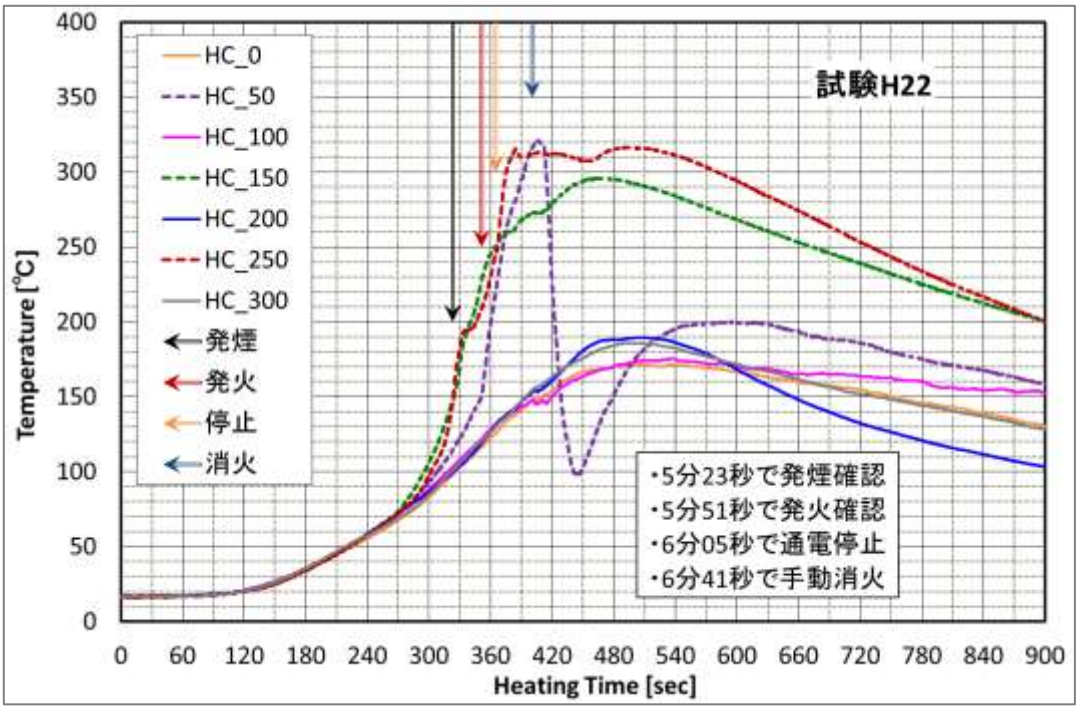


図 94　試験 H22 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm）[1)]

試験 H22 におけるケーブルの燃焼性状を以下の通りに整理する。

- 試験時間 330 秒ごろに、ケーブルの発煙（内部発生ガスの放出）を確認した。
- その後、発生ガスの噴出速度が増大し、試験時間 350 秒（測定位置 50）、361 秒（測定位置 250）、および 368 秒（測定位置 150）でケーブルの発火を確認した。なお、試験時の発火機構については、発火時の測定温度が 243℃から 344℃の範囲であることから、発生ガスの自己発火であると考えられる。
- ケーブル発火後の試験時間 365 秒に通電を停止したところ、乱流火炎の連続火炎高さが急激に低下することを確認した。
- ケーブル通電の停止後も発生ガスが放出され、すぐには火炎が鎮火しないことを確認した。

４－２－２－７　試験 H31（難燃性低圧電力ケーブル，切込１カ所，水平）

ここで詳述する試験 H31 は、難燃性低圧電力ケーブルを用いた燃焼試験である。なお、切込導入数は１カ所（1500 ㎜）、トレイ姿勢は水平であり、ケーブルが発火した後の消火方法は、CO2 消火器による手動消火を実施している。試験 H31 における温度測定点については、以下に一覧として整理する。

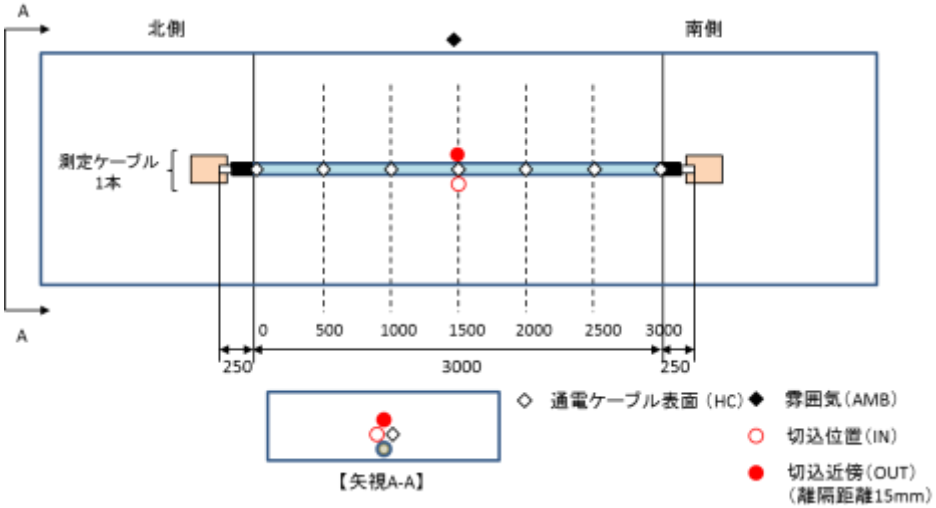


図 95　試験 H31 における温度測定点（数値単位：㎜）[2)]

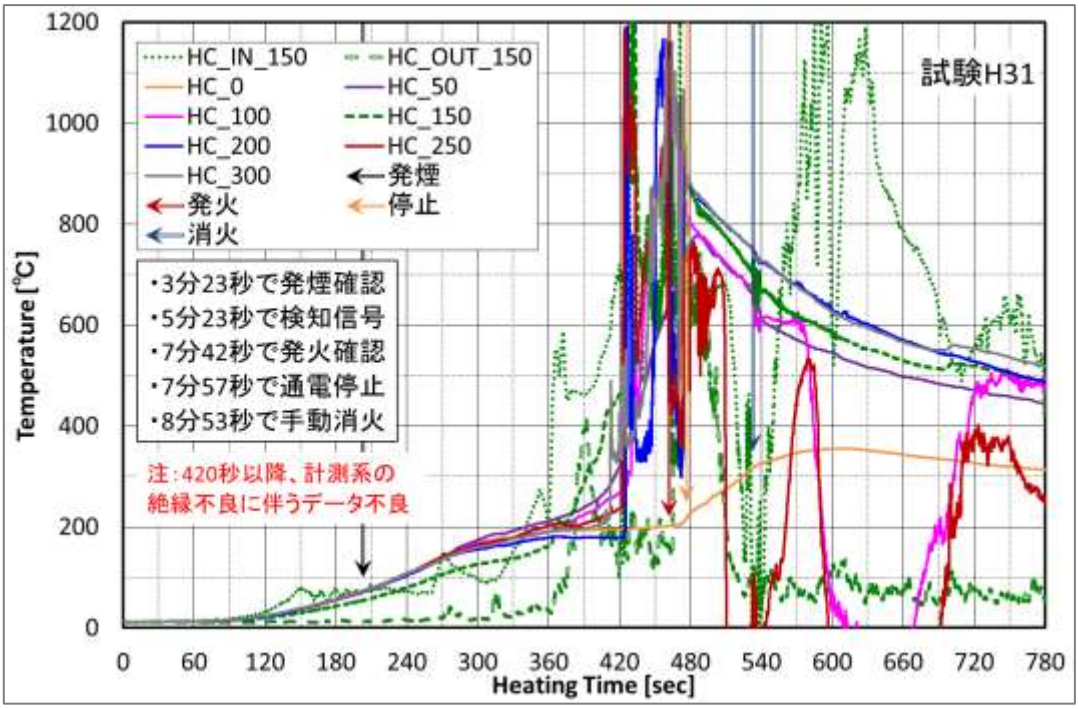
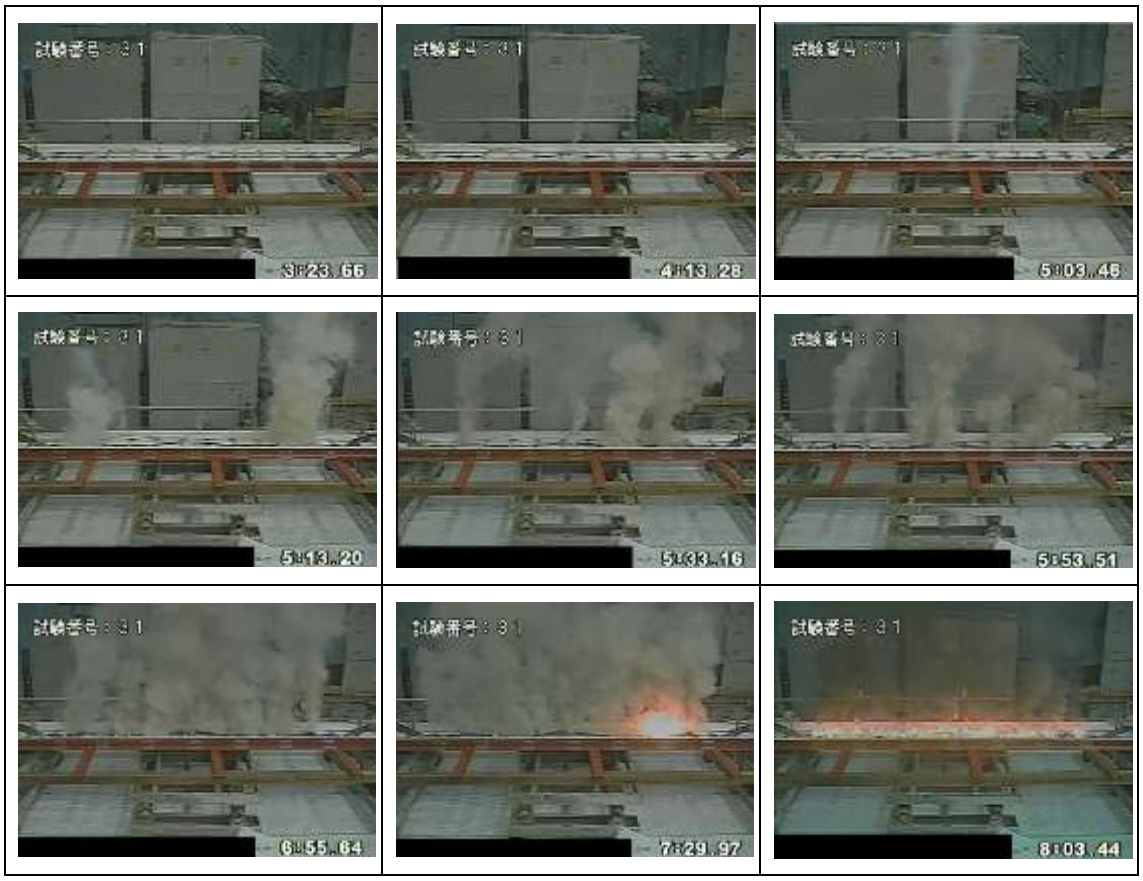


図 96　試験 H31 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[2)]

表 62　試験 H31 の燃焼性状（試験開始 3 分 23 秒～8 分 03 秒）[2)]



※表中のスナップ画像へ示されている時間は、図 96 とは異なっており、この点については動画キャプションの編集ミスと判断した。

図 96 には試験 H31 における温度測定点の測定結果を示している。なお、同じ測定位置におけるケーブルの切込部温度（HC_IN）、ケーブルの近傍空気温度（HC_OUT）、およびケーブルの表面温度（HC）については、同色を用いて整理することにした。

図中で示しているように、本ケースの試験時間 420 秒以降では、そのほとんどの測定値がデータ不良となっている。したがってその中のうちで、比較的影響を受けていないと思われる HC_0、HC_50、HC_OUT_150 について、述べることにする。

試験時間 462 秒の発火時における温度については、HC_0 が 201℃、HC_50 が 641℃、HC_OUT_150 が 163℃の温度を示している

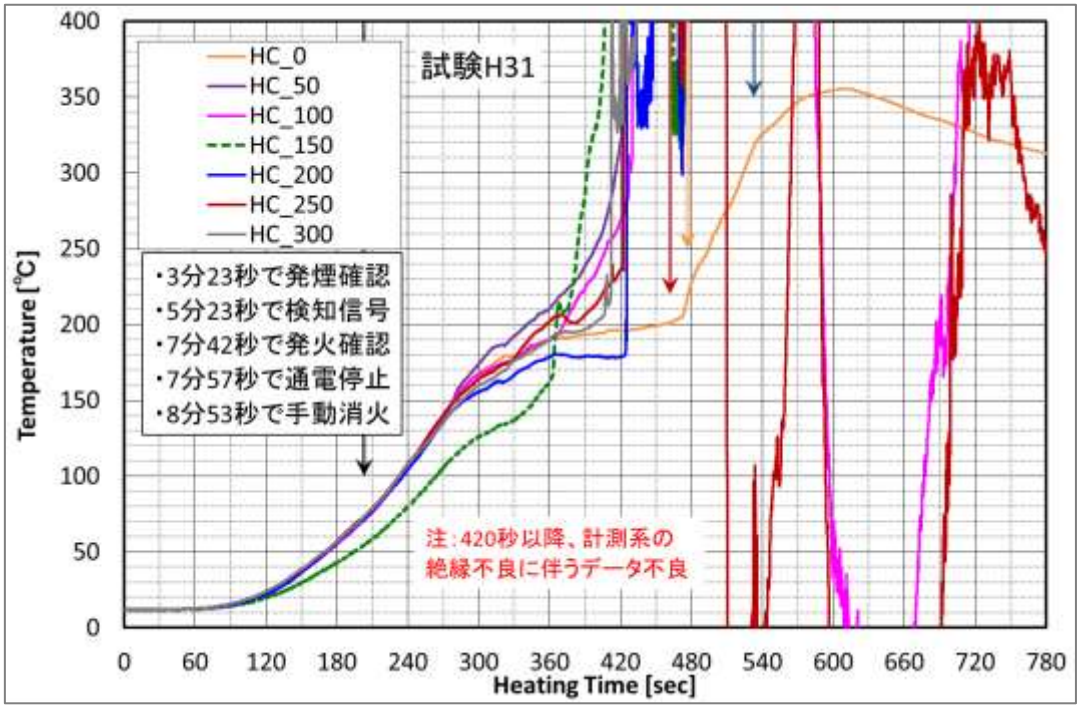


図 97　試験 H31 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm）[2)]

試験 H31 におけるケーブルの燃焼性状を以下の通りに整理する。

- 試験時間 329 秒ごろ、「パンッ」という破裂音に伴い、ケーブルの発煙（内部発生ガスの放出）を確認した。
- その後、至るところでシースの破裂が発生し、ケーブルの全長に亘ってガスの放出が生じる。試験時間の 462 秒（測定位置 250）にケーブルの発火を確認し、ケーブルを伝播経路としたケーブルの全長に亘る延焼を確認した。なお、試験時の発火機構については、発火時の HC_0 と HC_50 の測定温度が 201℃から 496℃の範囲を示しており、ケーブル近傍のガス温度も 163℃まで上昇していることから、発火のメカニズムについては、絶縁体部分の引火もしくは自己発火、または発生ガスの自己発火が考えられる。
- ケーブル発火後の試験時間 477 秒に通電を停止したところ、乱流火炎の勢いが鎮まっていくことを確認した。
- ケーブル通電の停止後も発生ガスが放出され、すぐには火炎が鎮火しないことを確認した。

４－２－２－８　試験 H32（難燃性低圧電力ケーブル，切込 3 カ所，水平）

ここで詳述する試験 H32 は、難燃性低圧電力ケーブルを用いた燃焼試験である。なお、切込導入数は 3 カ所（500 ㎜、1500 ㎜、2500 ㎜）、トレイ姿勢は水平であり、ケーブルが発火した後の消火方法は、CO2 消火器による手動消火を実施している。試験 H32 における温度測定点については、以下に一覧として整理する。

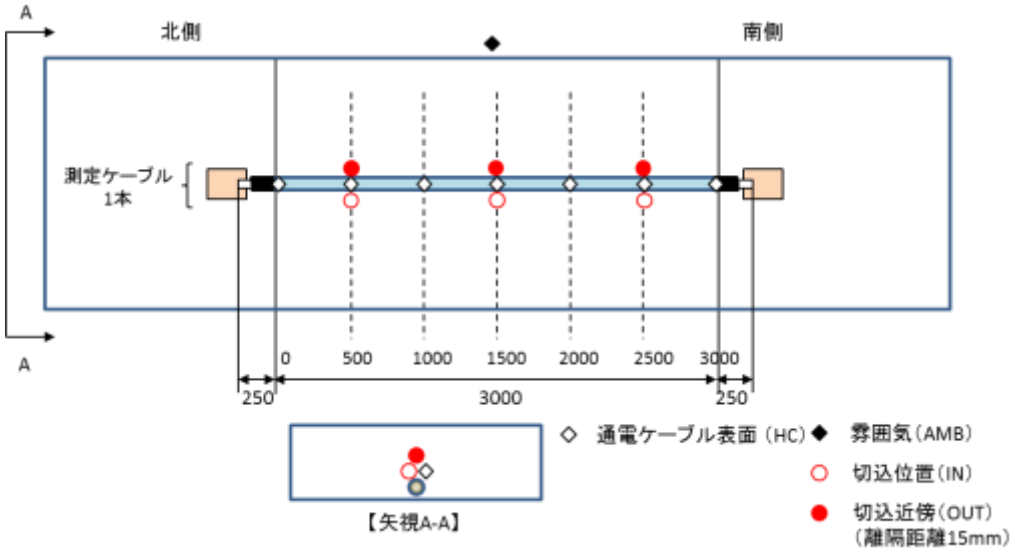


図 98　試験 H32 における温度測定点（数値単位：㎜）[2)]

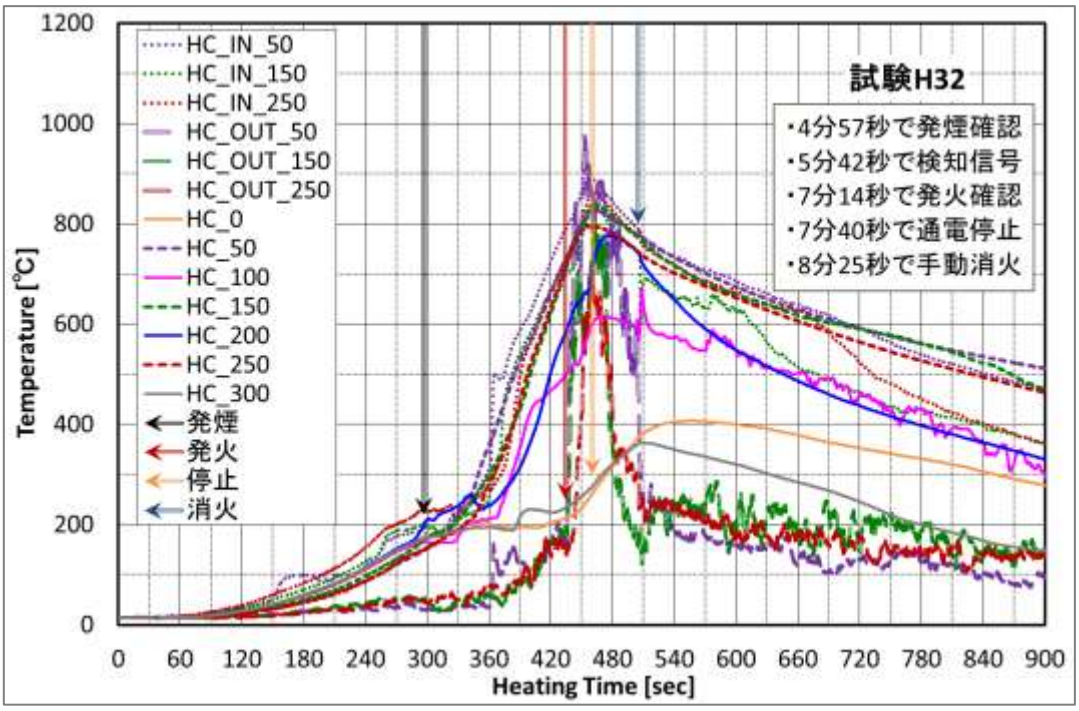


図 99　試験 H32 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[2)]

表 63　試験 H32 の燃焼性状（試験開始 4 分 57 秒～8 分 10 秒）[2)]

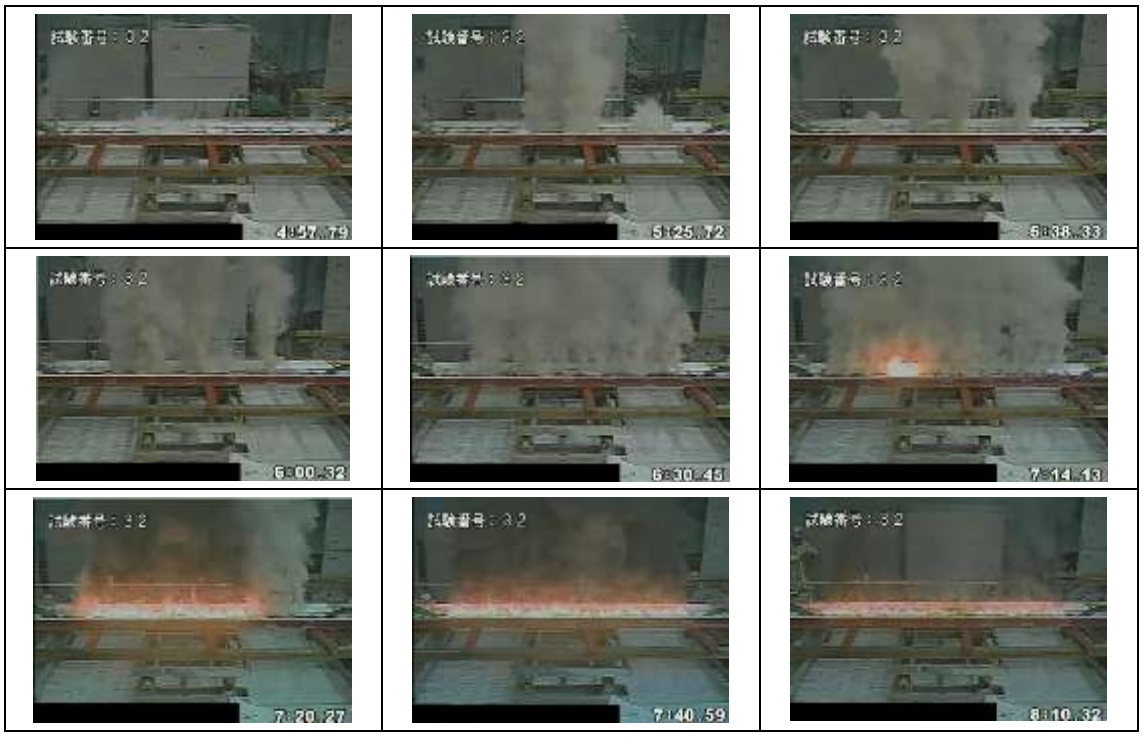


図 99 には試験 H32 における温度測定点の測定結果を示している。なお、同じ測定位置におけるケーブルの切込部温度（HC_IN）、ケーブルの近傍空気温度（HC_OUT）、およびケーブルの表面温度（HC）については、同色を用いて整理することにした。

はじめに図 99 に示した HC_OUT_50、HC_OUT_150、HC_OUT_250 へ着目すると、試験開始直後からケーブルの表面温度（HC）とケーブルの切込部温度（HC_IN）の温度上昇履歴と明らかに異なっていることが見て取れる。しかし、発煙確認時間の 297 秒から温度が徐々に上昇していき、試験時間 434 秒の発火に伴う急激な温度上昇があり、通電停止時間の 460 秒をピーク値として、火炎が鎮まるのに呼応した温度低下が確認でき、試験時間 505 秒の手動消火による急激な温度低下も確認できることから、ケーブル近傍のガス温度を測定できていたものと考えられる。

次に HC_IN_50、HC_IN_150、HC_IN_250 については、互いに類似した温度上昇履歴を示している。また発煙確認時間の 297 秒までの間は、ケーブル内部圧力の上昇による影響を受け、ケーブル表面温度と比べて温度が上昇している。その後、試験時間 297 秒にシースが破裂し、通電停止時間の 460 秒における 850℃程度まで、測定温度が急激に上昇している。なお、試験時間 505 秒に実施された手動消火による影響が見られないことから、これらの測定点については、電気導体の近傍にある構成材料と同化し、固体の温度を測定していた可能性がある。

またケーブルの表面温度（HC）の傾向は、①HC_0、HC_300、および②HC_50、HC_100、HC_150、HC_200、HC_250、の 2 つへ分類することができる。①HC_0、HC_300 につい

ては試験時間 380 秒ごろまでに、比較的ケーブルの表面（シース部分）を測定していたと思われるが、シースの破裂に伴う衝撃や表面材料の相変化によって、熱電対がケーブルの内部へ埋没し、構成材料と同化した可能性も考えられる。なお、手動消火を行った試験時間 505 秒が、ほぼピーク値となっていることから、これらについてはガスの温度ではなく、固体の温度を測定できていた可能性が高いと思われる。

一方、②HC_50、HC_100、HC_150、HC_200、HC_250 については、特に切込位置については、ケーブルの内部温度（HC_IN）と同様の温度上昇を示しており、これらについては、シースの破裂に伴う衝撃や構成材料の相変化の影響を受け、構成材料と同化し、導体近傍の絶縁体材料の温度を測定していた可能性がある。なお、測定温度のピーク値が通電停止時間の 505 秒と一致している点については、他の測定点と同じである。また HC_100 と HC_200 については、測定温度の数値に 150℃程度の差異があるものの、同様の現象による構成材料との同化が疑われる。ただし、同化した構成材料の深さについては、切込位置の熱電対と比較して、浅い部分にある材料と同化していた可能性が考えられる。

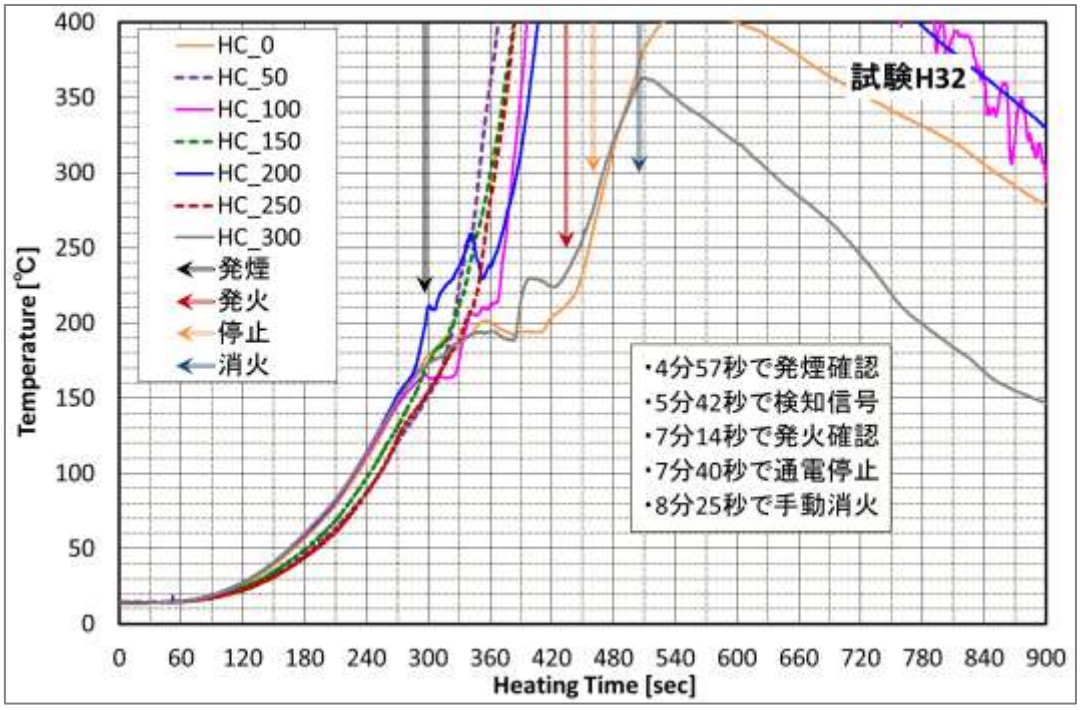


図 100　試験 H32 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm）[2)]

試験 H32 におけるケーブルの燃焼性状を以下の通りに整理する。

- 試験時間 297 秒ごろ、「パンッ」という破裂音に伴い、ケーブルの発煙（内部発生ガスの放出）を確認した。
- その後、至るところでシースの破裂が発生し、ケーブルの全長に亘ってガスの放出が生じる。試験時間の 434 秒（測定位置 100）にケーブルの発火を確認し、ケーブルを伝播

経路としたケーブルの全長に亘る延焼を確認した。なお、試験時の発火機構については、発火時の HC_100 の測定温度が 496℃を示しており、ケーブル近傍のガス温度も 200℃程度まで上昇していることから、発火のメカニズムについては、絶縁体部分の引火もしくは自己発火、または発生ガスの自己発火が考えられる。

- ケーブル発火後の試験時間 505 秒に通電を停止したところ、乱流火炎の勢いが鎮まっていくことを確認した。
- ケーブル通電の停止後も発生ガスが放出され、すぐには火炎が鎮火しないことを確認した。

４－２－２－９　試験 V31（難燃性低圧電力ケーブル，切込１カ所，垂直）

ここで詳述する試験 V31 は、難燃性低圧電力ケーブルを用いた燃焼試験である。なお、切込導入数は１カ所（500 ㎜）、トレイ姿勢は垂直であり、ケーブルが発火した後の消火方法は、CO2 消火器による手動消火を実施した。試験 V31 における温度測定点については、以下に一覧として整理する。

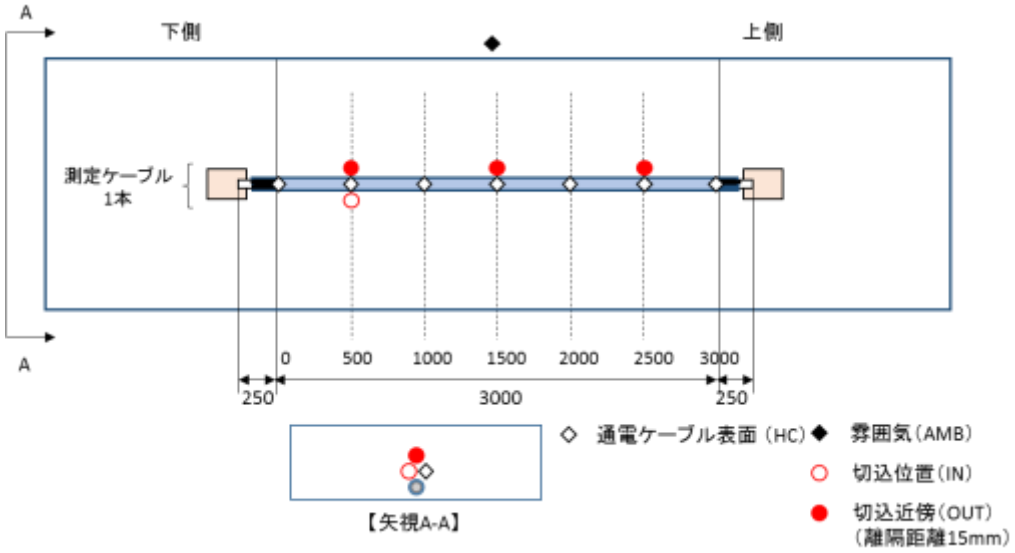


図 101　試験 V31 における温度測定点（数値単位：mm）[2)]

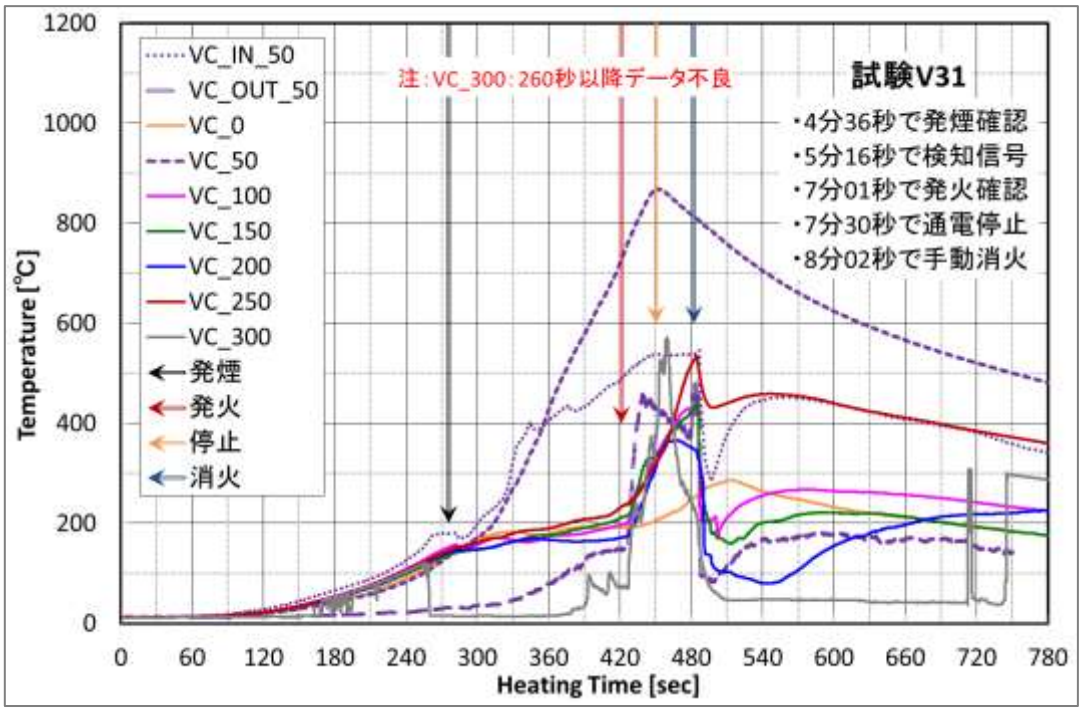


図 102　試験 V31 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[2)]

表 64　試験 V31 の燃焼性状（試験時間 4 分 36 秒～7 分 45 秒）[2)]

図 102 には試験 V31 における温度測定点の測定結果を示している。なお、同じ測定位置におけるケーブルの切込部温度（VC_IN）、ケーブルの近傍空気温度（VC_OUT）、およびケーブルの表面温度（VC）については、同色を用いて整理することにした。

ここでは VC_IN_50 について着目すると、その温度については、試験時間 276 秒の発煙時に 180℃まで上昇し、試験時間 421 秒の発火時には 487℃まで到達している。また VC_50 については、その他の測定点と比べて著しく高い温度を示しているため、シースの破裂や溶融に伴う、熱電対の埋没等が考えられる。なお、その他のものについては、発火による影響を受け、温度が上昇する傾向にあることがわかる。

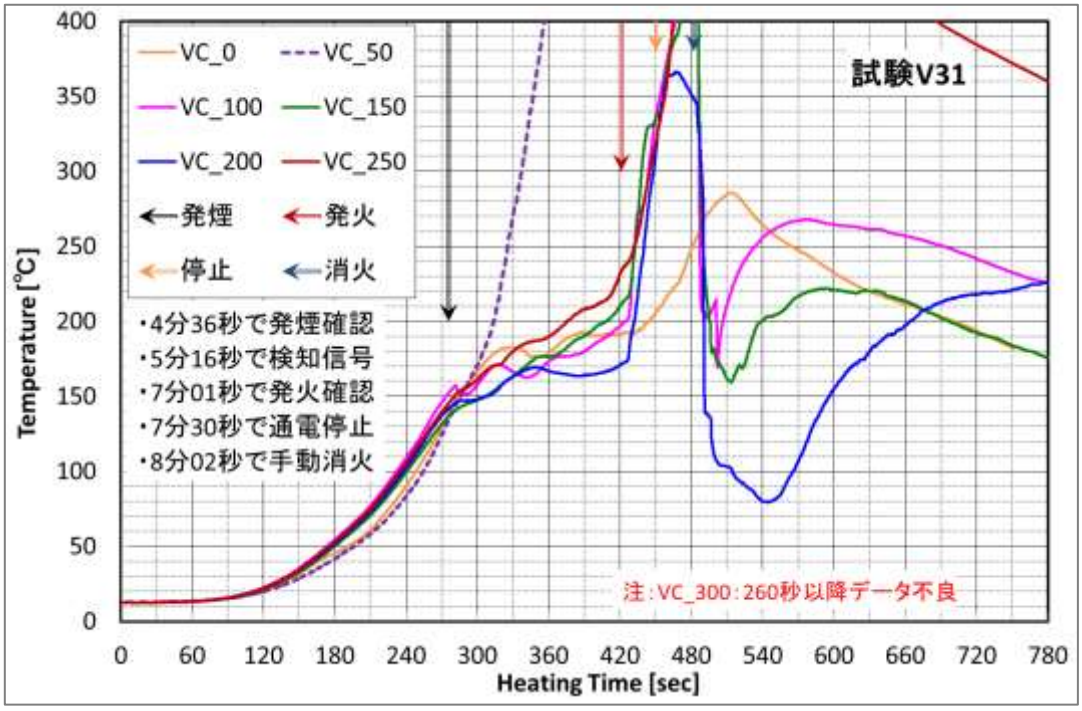


図 103　試験 V31 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm）[2)]

試験 V31 におけるケーブルの燃焼性状を以下の通りに整理する。

- 試験時間 276 秒ごろ、「パンッ」という破裂音に伴い、ケーブルの発煙（内部発生ガスの放出）を確認した。
- その後、至るところでシースの破裂が発生し、ケーブルの全長に亘ってガスの放出が生じる。試験時間の 421 秒でケーブルの発火を確認し、ケーブルを伝播経路としたケーブルの全長に亘る延焼を確認した。なお、試験時の発火機構については、発火時の測定温度が 487℃を示しており、ケーブル近傍のガス温度も 200℃程度まで上昇していることから、発火のメカニズムについては、絶縁体部分の引火もしくは自己発火、または発生ガスの自己発火が考えられる。
- ケーブル発火後の試験時間 450 秒に通電を停止したところ、乱流火炎の勢いが鎮まっていくことを確認した。
- ケーブル通電の停止後も発生ガスが放出され、すぐには火炎が鎮火しないことを確認した。

４－２－２－１０　試験 V32（難燃性低圧電力ケーブル，切込 3 カ所，垂直）

ここで詳述する試験 V32 は、難燃性低圧電力ケーブルを用いた燃焼試験である。なお、切込導入数は 3 カ所（500 ㎜、1500 ㎜、2500 ㎜）、トレイ姿勢は垂直であり、ケーブルが発火した後の消火方法は、CO2 消火器による手動消火を実施した。試験 V32 における温度測定点については、以下に一覧として整理する。

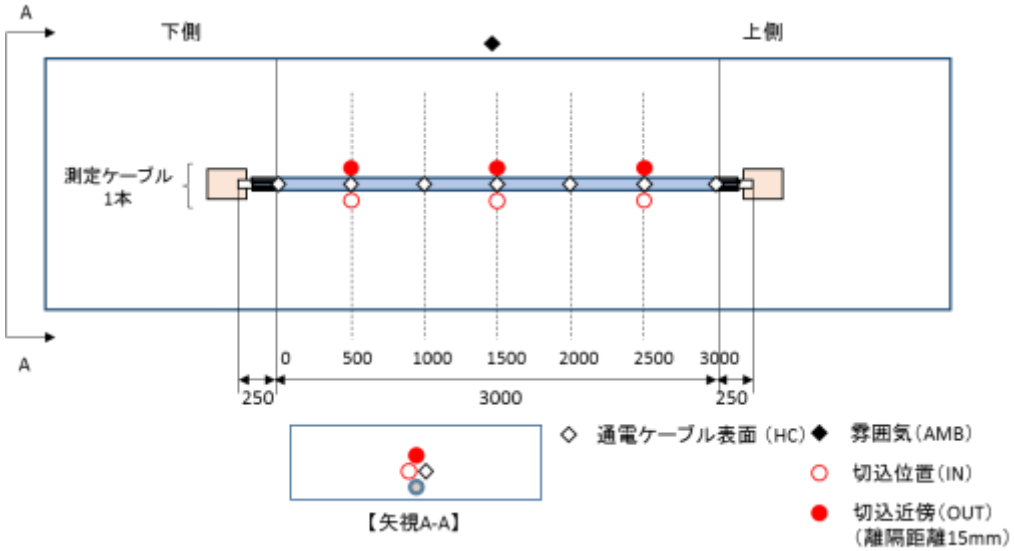


図 104　試験 V32 における温度測定点（数値単位：mm）[2)]

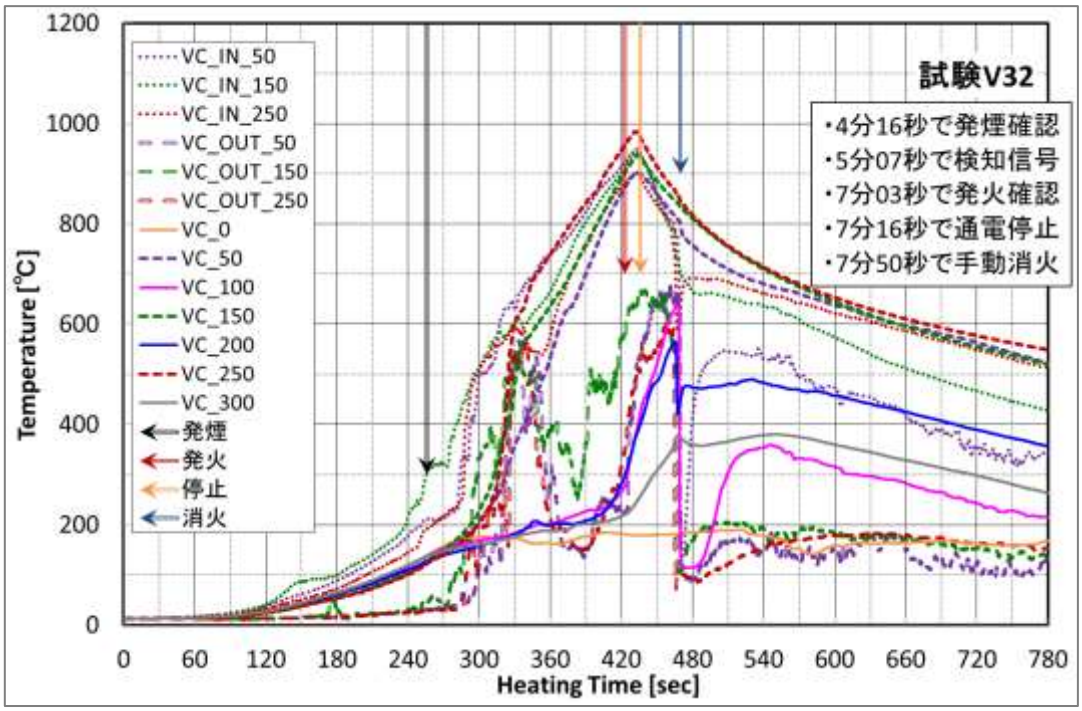


図 105　試験 V32 における測定点の温度上昇履歴（凡例の数値単位：cm）[2)]

表 65　試験 V32 の燃焼性状（試験時間 04 分 17 秒～07 分 40 秒）[2)]

図 105 には試験 V32 における温度測定点の測定結果を示している。なお、同じ測定位置におけるケーブルの切込部温度（VC_IN）、ケーブルの近傍空気温度（VC_OUT）、およびケーブルの表面温度（VC）については、同色を用いて整理することにした。

ここではケーブルの近傍空気温（VC_OUT）について着目すると、その温度については、試験時間 256 秒の発煙時において、26℃から 46℃を示しており、試験時間 423 秒の発火時においては、220℃から 576℃の範囲を示している。また VC_OUT について、340 秒ごろから 390 秒に欠けて、温度が著しく低下していることを読み取ることができるが、この点については、ガスの放出箇所が増えたことにより、ケーブル内部の圧力が低下したことが主な原因として考えられる。

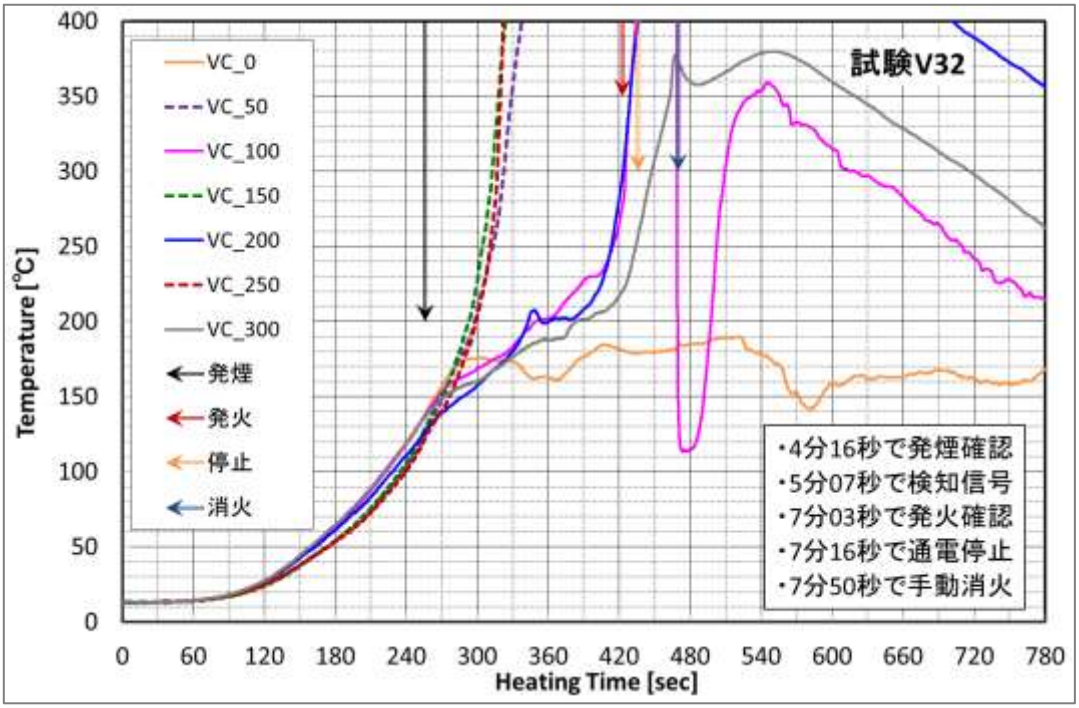


図 106　試験 V32 における測定点の温度上昇履歴 - 一部拡大（凡例の数値単位：cm）[2)]

試験 V32 におけるケーブルの燃焼性状を以下の通りに整理する。

- 試験時間 256 秒ごろ、「パンッ」という破裂音に伴い、ケーブルの発煙（内部発生ガスの放出）を確認した。
- その後、至るところでシースの破裂が発生し、ケーブルの全長に亘ってガスの放出が生じる。試験時間の 423 秒でケーブルの発火を確認し、ケーブルを伝播経路としたケーブルの全長に亘る延焼を確認した。なお、試験時の発火機構については、発火時のケーブル近傍空気温度が 220℃から 576℃の範囲を示しており、ケーブルの表面温度も発火点を超えていることから、発火のメカニズムについては、絶縁体部分の引火もしくは自己発火、または発生ガスの自己発火が考えられる。
- ケーブル発火後の試験時間 436 秒に通電を停止したところ、乱流火炎の勢いが鎮まっていくことを確認した。
- ケーブル通電の停止後も発生ガスが放出され、すぐには火炎が鎮火しないことを確認した。

４－２－３　過電流による動力ケーブルの消火試験

発火試験と同様の条件で、泡消火設備を用いた消火性能の確認試験が行われている。ここでは、参考までに表 66 および表 67 へそれらの試験結果を示した。

表 66　高圧電力ケーブル（難燃性）過電流消火試験結果 [1)]

試験名	電流	姿勢	発火管理位置	発火時間	検知時間	通電時間	消火状況
H11	2kA 目標	水平	1 カ所	8 分 30 秒	8 分 26 秒	8 分 36 秒	直ちに消火
H12			3 カ所	7 分 10 秒	7 分 35 秒	7 分 31 秒	直ちに消火
V11		垂直	1 カ所	5 分 51 秒	5 分 38 秒	9 分 09 秒	観察後消火
V12			3 カ所	7 分 02 秒	6 分 41 秒	7 分 47 秒	直ちに消火

表 67　低圧電力ケーブル（難燃性）過電流消火試験結果 [2)]

試験名	電流	姿勢	発火管理位置	発火時間	検知時間	通電時間	消火状況
H33	2kA 目標	水平	1 カ所	7 分 27 秒	6 分 44 秒	8 分 21 秒	直ちに消火
H34			3 カ所	6 分 48 秒	6 分 29 秒	7 分 21 秒	直ちに消火
V33		垂直	1 カ所	7 分 10 秒	6 分 09 秒	7 分 42 秒	直ちに消火
V34			3 カ所	7 分 15 秒	6 分 15 秒	7 分 39 秒	直ちに消火

消火試験時における発火時間および検知時間については、発火試験のものと同様の傾向であることが確認されている。また消火性能の確認試験では、防炎シート付ラダー型ケーブルトレイ上へ通電ケーブル 1 本の他に、複数本のケーブルが隣接ケーブルとして布設されている。なお、発火時の燃焼性状に大きな違いはなく、隣接ケーブルへの影響も一部火ぶくれや溶融が確認されてはいるものの、火炎が伝播して延焼するケースは確認されなかった、と報告されている。最終的には過電流火災に対して、今回検討した泡消火設備の有する消火性能は十分である、との評価がなされ、当該設備を導入する方向で火災対策が図られる見込みである。

４－３　まとめ

本章では、情報提供を受けた火災実証試験に関する分析を行い、難燃性高圧電力ケーブルと非難燃性高圧電力ケーブル、難燃性低圧電力ケーブルの過電流火災について、以下のことを把握した。

- 過電流によってケーブルが発火へ至るまでに要する時間は、ケーブルトレイの設置姿勢に関わらず、通電開始からおよそ 7 分程度である。
- 検知線（検知温度 90℃）による温度異常の検知時間は、発火時間から±1 分程度であり、トレイの姿勢や検知線の施工具合によっては影響を受ける可能性がある。
- 切り込み部から放出されるガス温度が 200℃を超えると、ケーブルへ発火が生じる傾向がある。これは低・高級脂肪族炭化水素等の発生ガスの発火温度と関係がある。
- 発火ケーブルが隣接ケーブルへ与える損傷は、表面の火ぶくれ・溶融程度である。
- ケーブルトレイを金属板等で保護する場合、トレイ姿勢によっては爆燃現象を引き起こす可能性があるため、パンチングメタルを使用する等の配慮が必要である。
- 泡消火設備の消火性能は、ケーブルの過電流火災に対して有効であり、その消火時間は泡の噴出から約 1 分以内である。
- 非難燃性高圧電力ケーブルの場合、過電流によってケーブルが発火に至るまでに要する時間は、通電開始からおよそ 6 分程度であり、難燃性高圧電力ケーブルの試験と比較して、1 分ほど早く発火する結果となった。この点については、ケーブルの構成材料に対する難燃処理の有無が大きく影響していると思われる。
- 過電流時におけるケーブルの発火機構について、実証試験の結果から以下のステップで考察を行い、ケーブルが発火する条件等の整理を行った。

● **過電流火災の発生メカニズム（推定）**

【ステップ】

① 過電流によるジュール熱で導体が発熱し、導体周りのケーブル構成材料が加熱される。

② 加熱によってケーブルの内部構成材料が温度上昇すると、内部構成材料の熱分解および含有水分の蒸発が生じる。

③ ケーブルのシースの下に熱分解ガス等が充満し、それに伴うシース内部圧力の上昇およびシースの温度上昇による機械的性質の変化により、シース部分が膨張する。

④ シースの膨張は機械的な強度の限界まで継続し、その後シースが破裂すると、破裂箇所から熱分解ガス等の可燃物を含んだ高温ガスが噴出する。

⑤ 発生ガスの噴出が継続するに伴い、可燃性ガスの濃度および温度が上昇し、ケーブルの発火機構については、以下の条件へ従うものと考えられる。

【ケーブルが発火する条件】

- ✧ 発生した可燃性ガスの濃度、および温度が燃焼限界へ到達する場合。
- ✧ 発生した可燃性ガスの濃度、および温度は燃焼限界へ到達しないが、絶縁体またはシースの温度が、材料固有の引火温度へ到達し、かつ、ケーブル構成材料の溶融等により高温の導体がむき出しとなる場合。
- ✧ 発生した可燃性ガスの濃度、および温度は燃焼限界へ到達しないが、絶縁体またはシースの温度が、材料固有の発火温度に到達する場合。

【ケーブルが発火しない条件】

- ✧ 発生した可燃性ガスの濃度、および温度が燃焼限界へ到達しない場合。
- ✧ 絶縁体またはシースの温度が、材料固有の引火温度へ到達しない場合。
- ✧ 絶縁体またはシースの温度が、材料固有の引火温度に到達するが、ケーブル構成材料の溶融等により高温の導体がむき出しとならない場合。
- ✧ 絶縁体またはシースの温度が、材料固有の発火温度に到達しない場合。

参考文献

1）電力中央研究所：難燃性動力ケーブルの過電流による燃焼試験，平成 26 年 09 月（非公刊）

2）電力中央研究所：難燃性低塩酸耐熱ビニルシース製 600V 電力ケーブルの過電流による燃焼試験，平成 27 年 03 月（非公刊）

3）原子力規制委員会：実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準,平成 25 年 06 月

4）David Notley：‘Appendix R Presentation’, Seminar on the BFN Fire sponsored by the NRC's Office of Nuclear Regulatory Research (RES), June 30, 2008, http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/brochures/br0361/s1/seminar-notley.pdf

5）電力共同研究：ケーブル火災及び制御盤火災に関する実証研究，PART-1「ケーブル火災に関する実証研究」，昭和 57 年（1982）09 月

第五章　過電流を模擬したケーブル燃焼試験の熱伝導解析

ケーブルの燃焼過程には、様々な物理現象が含まれている。したがって、それらのすべてをモデル化することは容易でないものの、ある種の仮定に基づき、現象を単純化した上で、問題の解決にアプローチすることは非常に重要である。なお、本章については、過電流火災へ対する有効な評価手法の提案を最終目標として、それらに関する簡易な計算モデルを構築することを目的としている。

５－１　ケーブル内部温度の上昇に関する簡易予測モデルの提案

ここで提案する簡易予測モデルについては、円形断面を有する単心ケーブルの中心から半径方向への伝熱現象について、一次元熱伝導方程式を解くことを考える。したがって、以降で簡易予測モデルの前提条件を記述していく。

５－１－１　簡易予測モデルの前提条件 [1),2),3)]

- 本提案モデルでは、「円形断面を有するケーブル内部のジュール熱による伝熱現象については、半径方向の成分が支配的である。」という仮定に基づき、伝熱現象を一次元化している。なお、電気導体の電気抵抗値についても一様であるとみなすことから、導体で発生するジュール熱が均等となるため、周方向および長さ方向の伝熱を無視することにした。したがって、局所的な内部発熱が生じるようなケースでは、半径方向以外の成分にも更に無視し難い程度の伝熱が生じるため、提案モデルの予測精度は低下すると思われる。

- ケーブルの構成要素については、導体、絶縁体、外装（シース）、および見かけの空気層（ケーブル内部の空隙）を考慮し、各構成材料の熱物性値については、一様であるものとする。

- 導体の内部については、温度勾配をゼロと仮定し、導体の内部温度は一様であるものとする。

- 絶縁体およびシースの熱物性値（熱伝導率、比熱、密度）については、それらの温度依存を考慮しない。ただし、導体の電気抵抗値については、温度依存を考慮する。

- 加熱中にケーブルで発生する熱分解、相変化、着火および燃焼については、それらを全て考慮しない。

- 絶縁体の熱物性値（熱伝導率、比熱、密度）については、見かけの空気層を考慮することで、熱貫流率や熱容量の考え方に基づき、それらの値を補正することにする。

５－１－２　簡易予測モデルの基本式 [3)]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left\{ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} = \alpha \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right)$$

ここで α は熱拡散率[m²/s]、r はケーブル円形断面の半径[m]、T はケーブルの温度[K]である。

５－１－３　簡易予測モデルの数値解法

本モデルでは、上述した基本式をオイラー陽解法（Forward Time Central Space 法）で近似的に解く。その計算過程については、附則 B「オイラー陽解法の解説」を参照されたい。なお、ケーブルを円筒とみなし、その半径 R を N 等分した空間の離散化を考えると、空間刻み幅については、$\Delta r = R/N$ の関係が成立する。

５－１－４　簡易予測モデルの初期条件

導体、絶縁体、外装（シース）および周辺雰囲気の初期温度については、それぞれ実証試験時の値を参考として設定することにする。

５－１－５　簡易予測モデルの境界条件

半径 r_c の円筒について、N 等分した空間の離散化を考える。その空間刻み幅を Δr、時間刻み幅を Δt とすると、$r = r_0$ における境界条件は以下のように与えられる。

$$r = r_0 , \qquad \rho_c c_c V_c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q}_E + \dot{Q}_{loss}$$

ここで ρ_c は導体の密度[kg/m³]、c_c は導体の比熱[kJ/kg K]、V_c は導体の体積[m³]、Q_E は導体で発生するジュール熱[kW]、Q_{loss} は導体表面から絶縁体内部への熱伝導による放熱[kW]を表す。また Q_E および Q_{loss} は、それぞれ以下のように与えられる。

$$\dot{Q}_E = {i_t}^2 \cdot R_{t-\Delta t}$$

$$\dot{Q}_{loss} = -k_1 \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} \cdot 2\pi r_c L$$

ここで、i_t は時刻 t において試験体へ印加した電流の瞬時値[A]、$R_{t-\Delta t}$ は時刻 t-Δt における導体の電気抵抗値[Ω]、k_1 は見かけの空気層を考慮した絶縁体の熱伝導率[kW/mK]、L は電気導体の有効長さ[m]を表す。

また導体の断面積を S[㎟ ²]、銅の抵抗率を σ_T [μΩ・m]（値は図 107 を参照）とすると、導体温度 T[℃]における銅の電気抵抗値 R_T[Ω]ついては、以下の式で与えられる [4)]。

$$R_T = \sigma_T \cdot (L/S)$$

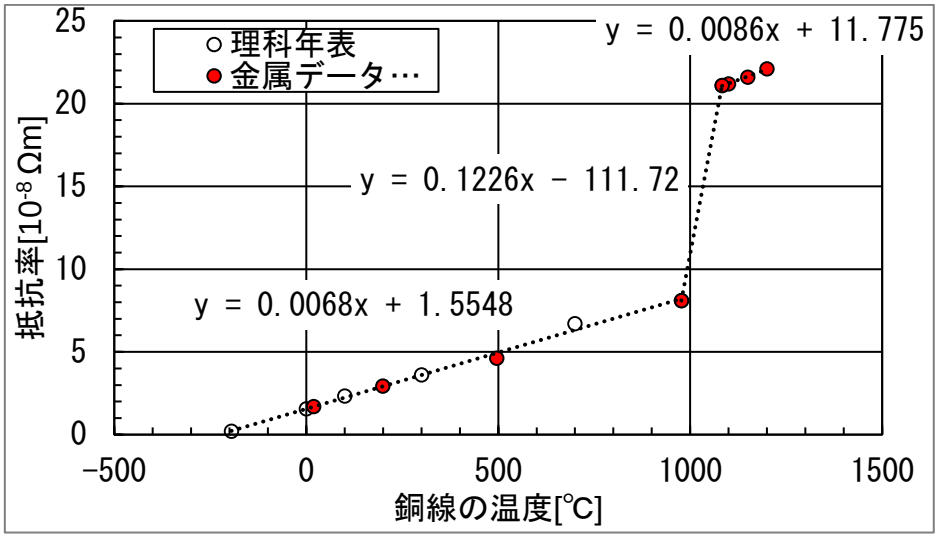


図 107　銅の抵抗率の温度変化

次に r=r_n における境界条件は以下のように与えられる。

$$r = r_N\,, \qquad h \cdot (T_{n,t} - T_{air}) = -k_2 \left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=n}$$

ここで h は対流熱伝達率 0.01[kW/m²K]、T_{air} は雰囲気温度[K]、$T_{n,t}$ はケーブルの表面温度[K]、k_2 は外装の熱伝導率[kW/mK]を表す。なお、境界条件の考え方については、附則 C も参照されたい。

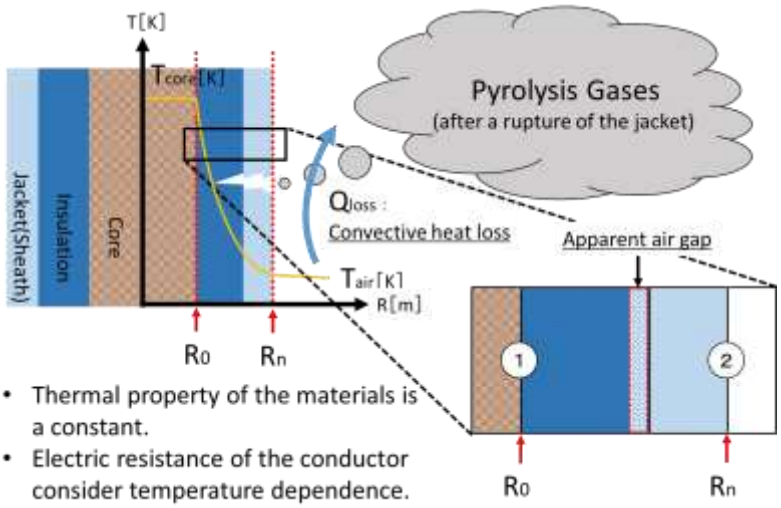


図 108　ケーブルにおける一次元モデリング要素体系

５－２　実証試験の測定データを用いた簡易予測モデルの検証

前節で提案した簡易予測モデルについて、実証試験の測定データを用いた検証を実施する。なお、提案モデルへの入力パラメータと初期値については、表 68 の通りである。

表 68　提案モデルの入力パラメータ [5)]

項目	設定
初期値	・雰囲気温度　試験時の測定データを基に設定 ・ケーブル温度　試験時の測定データを基に設定
熱物性／厚さ等（電気導体）	・熱伝導率　未設定 ・比熱　0.385 [kJ/kg・K] ・密度　8900　[kg/m3] ・断面積　100 ㎜^{2}（ケーブル製品の公称断面積） ・有効長さ　3.5m
熱物性／厚さ等（絶縁体：架橋ポリエチレン）	・熱伝導率　0.00033 [kW/m・K] ・比熱　2.301 [kJ/kg・K] ・密度　920　[kg/m3]
熱物性／厚さ等（シース：ポリ塩化ビニル）	・熱伝導率　0.00021 [kW/m・K] ・比熱　1.674 [kJ/kg・K] ・密度　1350 [kg/m3]
熱物性／厚さ等（空気）	・熱伝導率　0.0000241 [kW/m・K] ・比熱　1.12 [kJ/kg・K] ・密度　1.1763 [kg/m3] ・厚さ　入力パラメータの感度解析により決定
電流値	・単相交流電流の実測値を設定
時間ステップ幅	・電流の測定時におけるサンプリング周波数へ依存
空間ステップ幅	・１㎜として設定

ここで提案するモデルでは、ケーブル内部の空隙について、見かけの空気層を導入し、絶縁体部分の熱物性値（熱伝導率、比熱、密度）について、見かけの空気層厚さにより補正する措置をとった。なお、このような工夫については、空気層の影響を考慮しない場合、ジュール熱による導体の温度上昇の推定値がケーブル表面温度等の実測値と比較して、明らかな差異が生じてしまうためである。以下、その補正手順と補正結果を一覧で整理する。

５－２－１　熱物性値の補正手順

・<u>熱伝導率の補正</u>

熱伝導率の補正については、まず絶縁体厚さ[m]を熱伝導率[kW/m・K]で除することで、熱抵抗[m²・K/kW]を算出し、仮定した空気層厚さ[m]についても同様に熱抵抗[m²・K/kW]を算出する。次に絶縁体と空気層の熱抵抗[m²・K/kW]を合成し、逆数を求めることで熱貫流率[kW/m²・K]へ変換する。最後に熱貫流率[kW/m²・K]へ絶縁体の厚さ[m]をかけることで、補正した熱伝導率[kW/m・K]が求められる。

・<u>密度の補正</u>

空気層と絶縁体が占める体積[m³]を算出し、それぞれの密度[kg/m³]から質量[kg]を算出する。そして、それらの質量[kg]の合計値を絶縁体が占める体積[m³]で除することで、補正した密度[kg/m³]が求められる。

・<u>比熱の補正</u>

空気層と絶縁体の質量[kg]を用いて、各構成材料の熱容量[kJ/K]を算出し、その合計値を絶縁体の質量[kg]で除することで、補正した比熱[kJ/kg・K]が求められる。

また上記の手順で補正した絶縁体の熱物性値については、それぞれ以下の通りである。

表 69　空気層をパラメータとして補正した絶縁体の熱物性値（高圧ケーブル）

空気層の厚さ [m]	補正後の熱伝導率 [kW/m・K]	補正後の密度 [kg/m3]	補正後の比熱 [kJ/kg・K]	空気層の厚さ [m]	補正後の熱伝導率 [kW/m・K]	補正後の密度 [kg/m3]	補正後の比熱 [kJ/kg・K]
0.0001	0.000248	920.03	2.30124	0.0006	0.000109	920.18	2.30141
0.0002	0.000198	920.06	2.30127	0.0007	0.000098	920.21	2.30145
0.0003	0.000164	920.09	2.30131	0.0008	0.000089	920.24	2.30149
0.0004	0.000140	920.12	2.30134	0.0009	0.000081	920.26	2.30152
0.0005	0.000122	920.15	2.30138	0.001	0.000075	920.29	2.30156

表 70　空気層をパラメータとして補正した絶縁体の熱物性値（低圧ケーブル）

空気層の厚さ [m]	補正後の熱伝導率 [kW/m・K]	補正後の密度 [kg/m3]	補正後の比熱 [kJ/kg・K]	空気層の厚さ [m]	補正後の熱伝導率 [kW/m・K]	補正後の密度 [kg/m3]	補正後の比熱 [kJ/kg・K]
0.0001	0.000198	920.06	2.30127	0.0006	0.000065	920.35	2.30163
0.0002	0.000140	920.12	2.30134	0.0007	0.000057	920.41	2.30170
0.0003	0.000109	920.18	2.30141	0.0008	0.000051	920.47	2.30177
0.0004	0.000089	920.24	2.30149	0.0009	0.000046	920.53	2.30184
0.0005	0.000075	920.29	2.30156	0.001	0.000042	920.59	2.30192

５－２－２　空気層の入力値に関する検討

ここでは表 70 を用いて、空気層厚さの入力パラメータに関する感度解析を実施する。なお、感度解析に用いる試験ケースについては、低圧電力ケーブルの試験 H32 を選別した。以下、感度解析の結果について記述する。

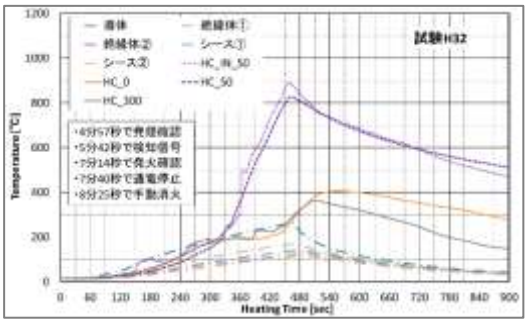


図 109　空気層厚さ 0.0 mmの場合

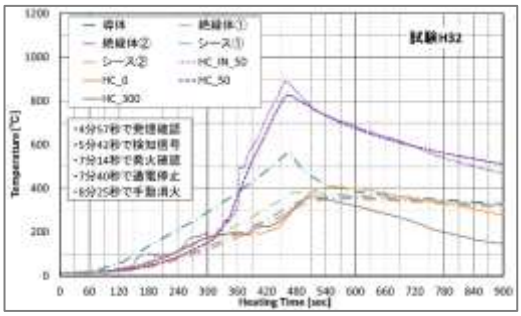


図 110　空気層厚さ 0.1 mmの場合

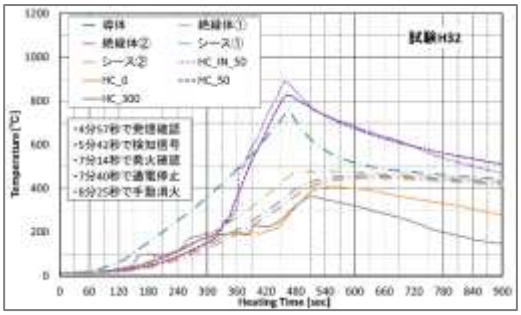


図 111　空気層厚さ 0.2 mmの場合

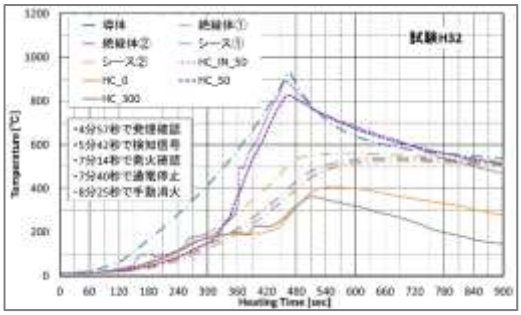


図 112　空気層厚さ 0.3 mmの場合

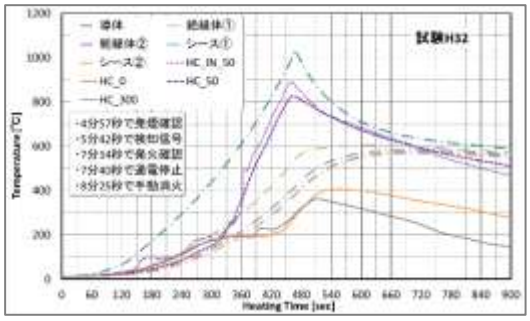


図 113　空気層厚さ 0.35 mmの場合

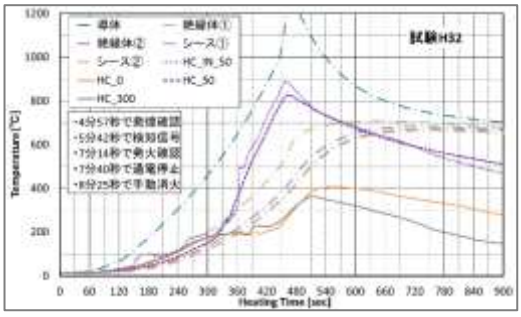


図 114　空気層厚さ 0.4 mmの場合

図　109 から図　114 には本提案モデルにおける空気層厚さの感度解析結果を示している。なお、図中の一点鎖線は提案モデルによるケーブル内部温度の推定値である。実際の試験においては、導体の温度を測定していないため、試験時の導体温度と推定した導体温度については比較ができないものの、図中の凡例 HC_IN_50 および HC_50 の温度上昇履歴からは、

発火する瞬間に 800℃以上の温度を測定していることが見て取れる。この点については、あくまで温度のみで考えると、火炎中に熱電対が存在している可能性も否定できないが、手動消火した後の温度履歴を見ると、燃焼の最盛期において、ガスの温度を測定しているとは考え難い。

したがって HC_IN_50 については、ケーブル発火の直前までにかけて、導体に限りなく近い部分の温度を測定していた、と推測される。以上の仮説に基づき、導体温度の推定値と HC_IN_50 のピーク値を比較し、両者の値が最も一致する空気層厚さを検討すると、その値は 0.3 ㎜となることを確認した（図 112 参照）。

したがって、以下のモデル検証の入力パラメータとしては、見かけの空気層厚さとして、0.3 ㎜を用いることにした。なお、補正した絶縁体の熱物性値は以下の通りである。

表 71　提案モデルの検証に用いた絶縁体の入力パラメータ

空気層の厚さ [m]	補正後の熱伝導率 [kW/m・K]	補正後の密度 [kg/m3]	補正後の比熱 [kJ/kg・K]
0.0003	0.000109	920.18	2.30141

５－２－３　ケーブルの発火試験を用いたモデル検証

ここでは、低圧電力ケーブルを試験体とした発火試験の 4 ケース（H31、H32、V31、V32）を用いて、提案モデルの検証を実施する。なお、計算モデルの入力パラメータについては、表 68 と表 71 を参照されたい。

また本提案モデルの検証については、「ケーブルの構成材料が発火温度へ到達した場合に、ケーブルが即座に発火する」という考え方に基づき、以下の判定条件を適用することで、ケーブルの発火タイミングを予測している。

【発火タイミングの判定条件】

■　ケーブル構成材料のうち、シースの温度が材料固有の融点を超え、かつ、ケーブル構成材料のうち、絶縁体の温度が材料固有の発火点へ到達する場合。

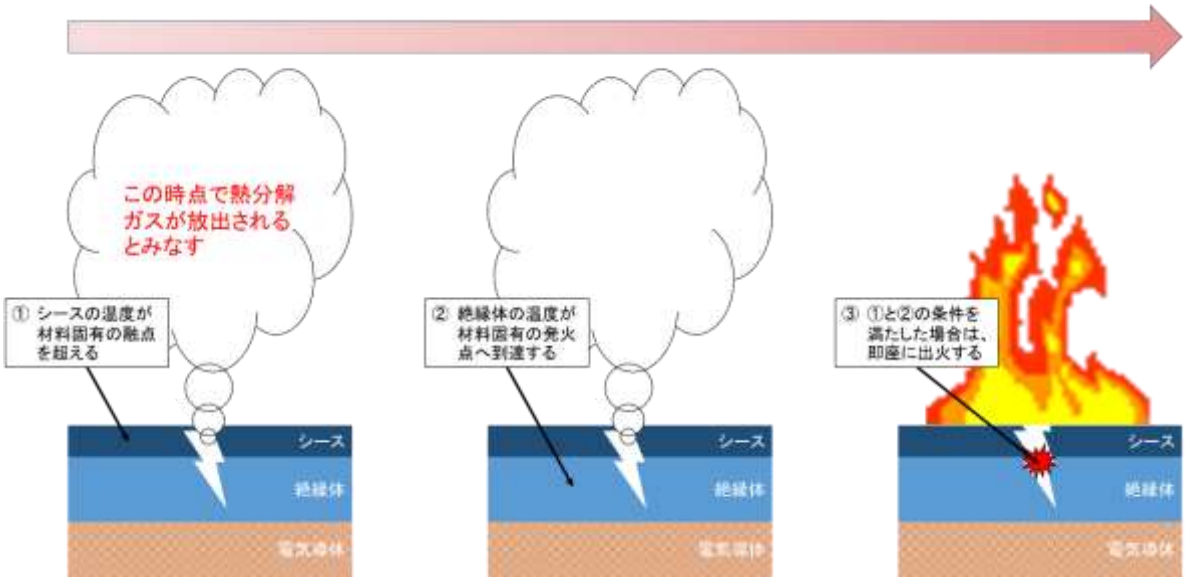


図 115　提案モデルにおける発火タイミングの判定条件

なお、低圧電力ケーブルの構成材料とその固有温度については、表 72 に示した通りである。

表 72　難燃性低圧電力ケーブルの固有温度 [6)]

構成要素	ケーブルの構成材料	材料の固有温度[℃]
絶縁体	難燃性架橋ポリエチレン（熱硬化性樹脂）	410（発火点）
シース	難燃性低塩酸特殊耐熱ビニル（熱可塑性樹脂）	212（融点）

５－２－３－１　試験 H31 を用いたモデル検証

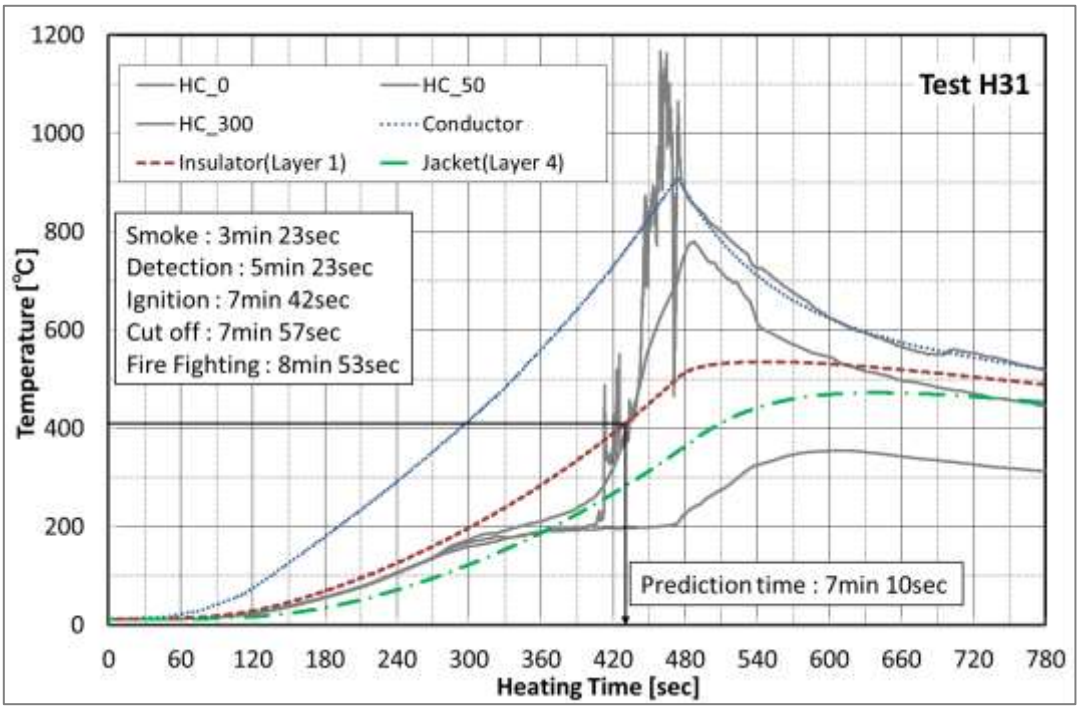


図 116　試験 H31 の温度実測値とモデルによる計算値の比較

図 116 には、試験 H31 における温度実測値と提案モデルによる計算結果を示している。なお、図中の実線は試験時における実測値であり、破線類はモデルの計算値を示している。

これらの計算結果に対して、提案モデルにおける発火タイミングの判定条件を適用すると、その発火タイミングは 7 分 10 秒という判定結果になった。この予測結果は実証試験の 7 分 42 秒と比較して、およそ 30 秒程度早い予測ができることを確認したが、試験 H31 では計測系の絶縁不良により、開始から 420 秒後にデータ不良が生じている（表中の実測値は絶縁不良の影響が少ない、と判断したものを示している）。したがって、この試験へ対する予測精度については、疑問が残っている（実験映像の表記時間とデータ上の表記時間にもズレが存在している）。

５－２－３－２　試験 H32 を用いたモデル検証

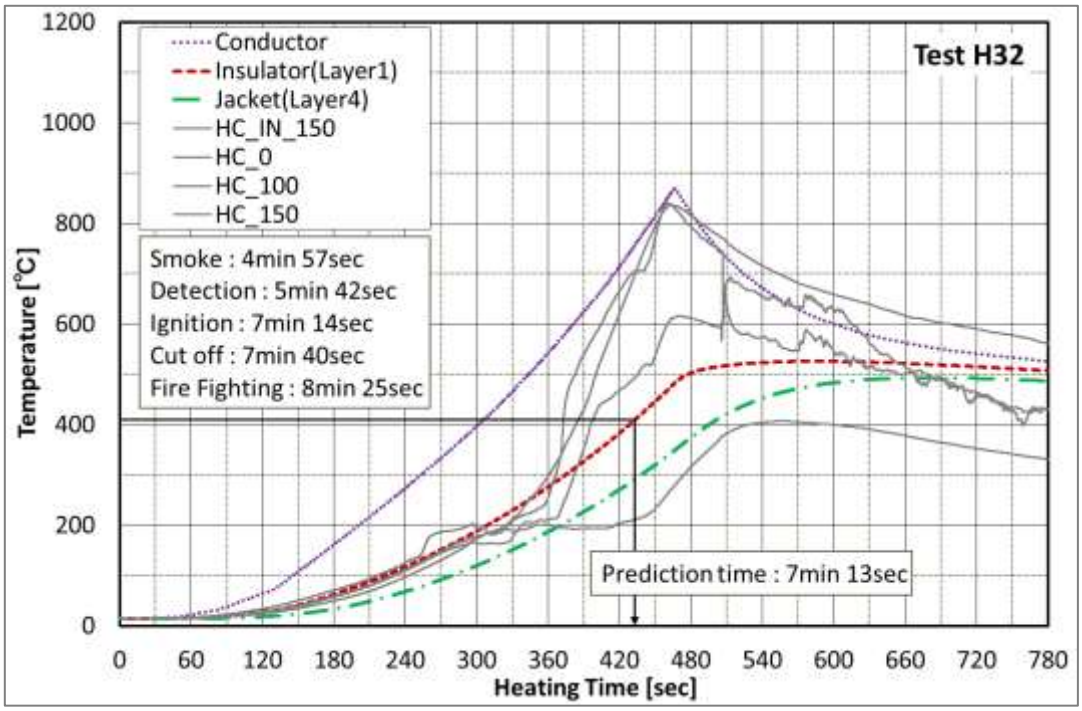


図 117　試験 H32 の温度実測値とモデルによる計算値の比較

図　117 には、試験 H32 における温度実測値と提案モデルによる計算結果を示している。なお、図中の実線は試験時における実測値であり、破線類はモデルの計算値を示している。

これらの計算結果に対して、提案モデルにおける発火タイミングの判定条件を適用すると、その発火タイミングは 7 分 13 秒という判定結果になった。この予測結果は実証試験の 7 分 14 秒と比較して、およそ 1 秒程度早い予測ができることを確認した。

５－２－３－３　試験 V31 を用いたモデル検証

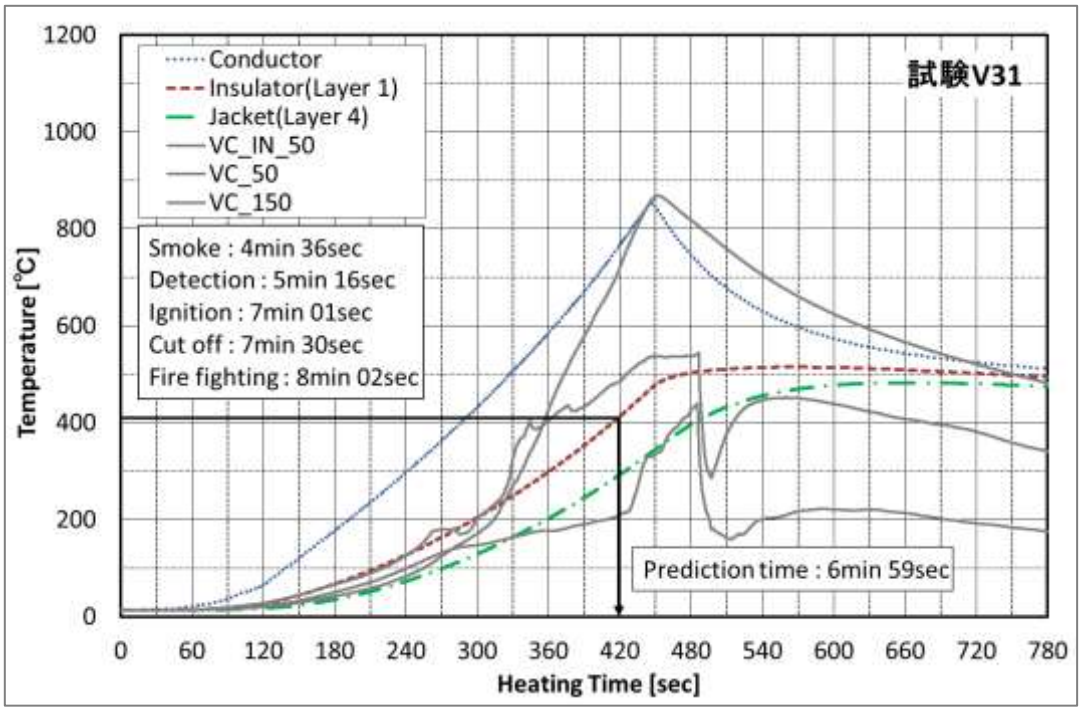


図 118　試験 V31 の温度実測値とモデルによる計算値の比較

図　118 には、試験 V31 における温度実測値と提案モデルによる計算結果を示している。なお、図中の実線は試験時における実測値であり、破線類はモデルの計算値を示している。

これらの計算結果に対して、提案モデルにおける発火タイミングの判定条件を適用すると、その発火タイミングは 6 分 59 秒という結果になった。この予測結果は実証試験の 7 分 01 秒と比較して、およそ 2 秒程度早い予測ができることを確認した。

５－２－３－４　試験 V32 を用いたモデル検証

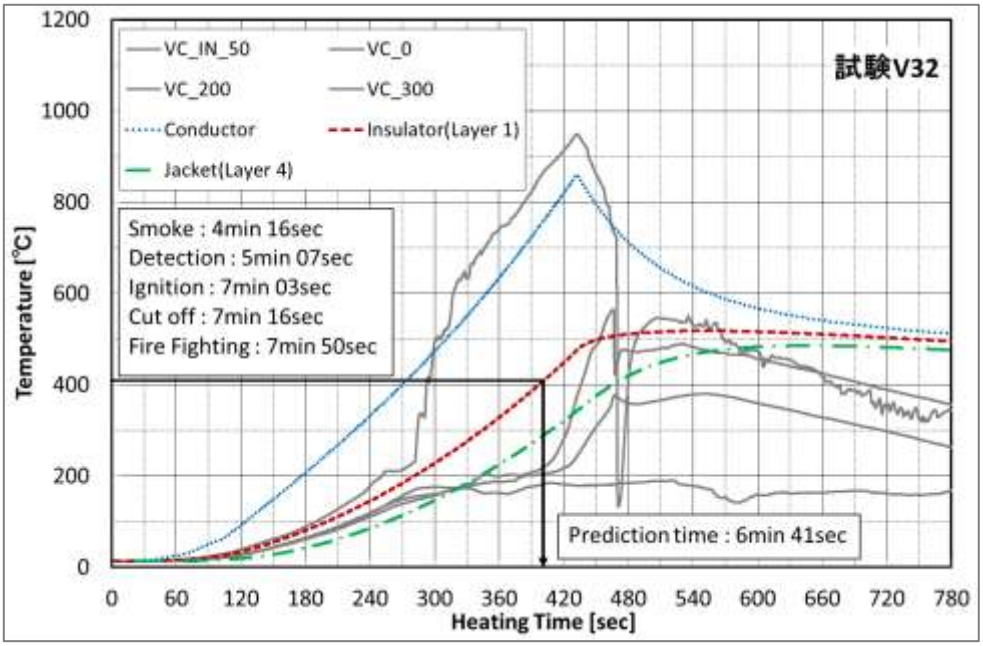


図 119　試験 V32 の温度実測値とモデルによる計算値の比較

図　119 には、試験 V32 における温度実測値と提案モデルによる計算結果を示している。なお、図中の実線は試験時における実測値であり、破線類はモデルの計算値を示している。

これらの計算結果に対して、提案モデルにおける発火タイミングの判定条件を適用すると、その発火タイミングは 6 分 41 秒という結果になった。この予測結果は実証試験の 7 分 03 秒と比較して、およそ 22 秒程度早い予測ができることを確認した。

５－３　ケーブルの発火に関する判定基準とその妥当性

以上のように、低圧電力ケーブルを用いた発火試験に対して、提案モデルの検証結果を示してきたが、本提案モデルにおいては、ケーブルで発生する熱分解、相変化、着火、および燃焼について考慮していないため、ケーブルシース温度の計算値が上昇し続けている。

またその発火タイミングの判定基準については、構成材料固有の引火点もしくは発火点、または発生ガスの濃度、等が考えられるが、本モデルでは固体内の伝熱現象のみを対象としていることから、発生ガスの濃度で発火タイミングを判定することはできない。

一方、ケーブル構成材料の固有温度として、引火温度および発火温度が存在しているが、過電流時におけるケーブルの発火機構の考察から、引火の場合は導体が着火源の役割を担うものと推察される。しかしながら、導体そのものが大気中にむき出しとなるタイミングには、ケーブル構成材料の相変化および熱分解などを考慮する必要があり、簡易的な評価は不可能である。したがって、本モデルにおける発火タイミングの判定に関しては、ケーブル構成材料の固有温度のうち、発火温度を採用し、その判定条件としては以下のものを適用した。

【発火タイミングの判定条件】

- ケーブル構成材料のうち、シースの温度が材料固有の融点を超え、かつ、ケーブル構成材料のうち、絶縁体の温度が材料固有の発火点へ到達する場合。

５－４　考察とまとめ

本章で提案した簡易予測モデルと発火の判定条件を用いた場合、過電流時における低圧電力ケーブルの発火タイミングについて、実証試験結果と計算結果の比較により、一定の精度で予測できることを確認した。なお、本モデルで導入している見かけの空気層厚さについては、ケーブル外径や構造に依存すると思われるため、それらに関する更なる検討については、今後の課題として挙げられる。

また本論文中では、発火機構の違いを理由に記載を省略しているが、高圧電力ケーブルの発火試験に対して、同様の検討を行った場合、その計算結果は実証試験結果と比べて、著しく乖離する傾向にあることを確認しており、この点については、①空気層厚さの違いと、②高圧電力ケーブルの構造上の違い、の 2 つが原因であると思われる。

まず、前者については、熱分解の進展に伴うケーブル内部の空隙を熱的に考慮するために、見かけの空気層という考え方を導入しているが、低圧電力ケーブルの発火試験を用いて、パラメータの感度解析により定めた 0.3 ㎜という空気層厚さは、高圧電力ケーブルには適切でないことを確認している。すなわち、この空気層厚さについても、何かしらの関係性が存在すると思われるが、それらについては、更なる検討の余地があることを意味する。

一方、後者については、提案モデルでは空気層のほか、①導体、②絶縁体、③シースの３つの構成要素を考慮しているが、高圧電力ケーブルの構造は、そのほか内部半導電層、外部半導電層、金属遮へい、押えテープ、等の要素からも構成されている。したがって、このような傾向には、それらの要素の熱的な影響については、無視できないことが暗示されている。

その他、ケーブル表面からの放射伝熱による失熱、材料の相変化、熱分解、燃焼など、モデルの高度化に関しては、挙げ出したらキリがないほどの検討項目を挙げることができるが、今回の検討においては、過電流火災に関して、提案モデルによる判定を行った場合は、その発火タイミングを一定の精度、かつ、安全側で評価することができる傾向にあることを確認するまでに留め、ここで列挙した内容については、今後の課題として取り組んでいくことにする。

したがって、本章で得られた知見は以下の通りである。

- 提案した簡易予測モデルへ発火タイミングの判定条件を適用すると、過電流時における低圧電力ケーブル（1 心，100 ㎜^{2}）の発火タイミングについて、一定の精度で予測できることを確認した。

また今後の課題としては、以下のものが挙げられる。

- 更なるモデルの検証を行い、検証結果の拡充を図ることが必要である。
- 見かけの空気層厚さが有する何かしらの関係性について、他の試験結果などを通じた考察に基づき、その関係を明らかにする。
- 高圧電力ケーブルの場合、モデル上の構成要素を改良することで、予測精度が改善される可能性がある。
- モデルの高度化に向けて、表面からの放射伝熱による失熱、材料における相変化、熱分解、燃焼等について、取り組んでいく必要がある。

参考文献

1）NUREG/CR-6931：‘Thermally-Induced Electrical Failure (THIEF) Model’, Volume 3, April 2008, http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0811/ML081190261.pdf

2）Kevin McGrattan：‘Thermally-Induced Electrical Failure (THIEF) Model’, NIST, http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6931/v1/carolfire-presentations/acrs-subcommittee-nist.pdf

3）日本機械学会：機械工学便覧α-5 熱工学，第 4 章，http://www.jsme.or.jp/publish/books/books_contents/newbinran.html

4）内田由美子ほか：銅線の電気抵抗の温度変化，山口大学教育学部付属教育実践総合センター研究紀要，第 32 号（2011），http://shige.edu.yamaguchi-u.ac.jp/denkiteikou_uchita.pdf

5）電線総合技術センター：EM 電線・光ファイバのデータベース整備研究成果報告書，平成 12 年 03 月，http://www.jectec.or.jp/03cable/

6）関西電力株式会社：高浜 3 号炉及び 4 号炉火災防護について，平成 26 年 02 月 27 日，https://www.nsr.go.jp/data/000035365.pdf

第六章　結論

６－１　まとめ

本研究では、ケーブル内部からの熱衝撃によって生じる火災を対象とし、その中でもケーブルの過電流火災について、既往の火災実証試験に関する詳細分析から、得られる知見を再整理し、ケーブル火災の発生メカニズム及びその燃焼性状を把握することを目的とした。

第一章では、原子力施設の火災防護対策について、日本で現行する規制基準の策定経緯まで遡り、今後も更なる高度化が必要であるという背景を述べた。またケーブル火災のうち、内部からの熱衝撃による火災については、科学的な知見が限られており、技術的にも十分な検討がなされていないという現状を述べた。そのほか原子力分野の安全性に関するトピックについては、それらに対する私見を記述している。

第二章では、電線とケーブルの基本事項について整理した。日本における安全規制の大枠については、関係法令の適用範囲を把握し、その範囲を製造販売、工事および維持運用といった三段階でまとめている。また電線とケーブルの違いについては、関係法令上の定義等の比較を通じて、両者の違いを明らかにした。その他、ケーブルの基本構造については、ケーブルを構成する各要素の機能等を含めて詳細に把握を行った。加えて、ケーブルの種類については一覧として整理し、国内外における主な規格や性能の評価項目、燃焼試験方法などの概要を述べたことで、電線とケーブルに関する基本事項を整理できたものと考える。

第三章では、ケーブルが寄与した主な火災事例を紹介し、ケーブル火災の発生傾向を把握するために、火災の統計を用いた検討を行った。その結果、ケーブルの外部へ熱暴露を受けることで発生するケーブル火災（外部要因）とケーブルの内部発熱等から発生するケーブル火災（内部要因）の間には、日本で 1 年間に起きる火災のうち、約 3000 件程度が本論文におけるケーブル火災へ該当するが、外部要因と内部要因の内訳は、各年度に依存しない 3 対 7 の関係があることを明らかにし、予想に反して内部要因の事例数の方が圧倒的に多いという実態を把握した。

第四章では、情報提供を受けた動力ケーブルの過電流時における、燃焼試験データの詳細分析を目的としている。それらの分析結果からは、電力ケーブルの過電流火災については、3 つの発火機構が存在するものと思われ、高圧電力ケーブルと低圧電力ケーブルで異なる形態をとる可能性があることを指摘した。またそのような考察に基づき、過電流時におけるケーブルの発火機構については、発火へ至るまでの物理現象について、ステップごとに整理を行った。その他、ケーブルの燃焼性状の違いについては、試験映像のスナップショットを用いて整理している。

第五章では、過電流火災へ対する有効な火災影響評価手法の提案を最終目標として、円筒形座標における一次元熱伝導方程式へ基づく簡易な計算モデルを構築した。なお、その際には見かけの空気層という概念を導入するなど、いくつかの実践的な検討を試みている。この空気層厚さについては、低圧電力ケーブルで 0.3 ㎜を適用した場合、計算モデルによる導体温度の推定値が、実験結果と類似する可能性が高くなることを感度解析によって確認した。また、絶縁体及びシース温度の推定値へ対しては、提案した発火に関する判定条件を適用した場合、実証試験時の発火タイミングと比較して、一定の精度で発火タイミングを予測できる傾向にあることを確認した。なお、ここで構築した簡易計算モデルについては、いくつかの物理現象を無視しており、更なるモデルの改良が必要であると思われる。

以上のことから、本研究は電線およびケーブルの基本事項を把握することから始まり、統計に基づく火災件数の実態、主なケーブル火災事例の概要および火災実証試験の詳細分析等を通して、ケーブル火災に関する知見の拡充を図ってきた。また過電流火災に対する有効な評価手法の検討としては、一次元熱伝導方程式に基づく簡易予測モデルを構築し、試験結果を用いたモデルの検証を実施した。この評価手法の考え方は、非常に簡易的なものであるものの、ある現象を評価する上で最も重要なことは、安全側の評価ができるか否かである。したがって、今回の検討内容を土台として、今後更なるモデルの高度化を図ることも必要となるが、最も簡易的な評価手法としての方法論として、1 つの指標を提案できたものと考える。

６－２　今後の課題

ケーブルの火災安全を確保する上でまずやるべきことは、対象となるケーブルの詳細を把握することである。ケーブルの火災を分類すると、熱暴露火災と過電流火災に大別することができるが、近年では後者に関する火災研究も実施されている。また、火災の評価を行う上で最も重要なパラメータは、可燃物の発熱速度（Heat Release Rate）を把握することである。したがってケーブルの場合は、コーンカロリーメータ試験でデータ収集することが一般的ではあるものの、過電流火災のように、ケーブルの内部からの熱衝撃による火災については、その評価方法の在り方も含めて、まだまだ検討の余地が残されていると思われる。

熱暴露火災を予測するモデルとしては、一次元熱伝導方程式に基づくものが代表例として挙げられるが、本論文では、過電流火災を予測するモデルとして、同様の方法論に基づき、モデルの検討を行った。なお、本論文中では見かけの空気層厚さを考慮することで、ある一定の精度を有する発火タイミングの予測結果が得られることを確認したが、この予測結果については、見かけの空気層厚さへ依存したものであることに留意されたい。したがって、この点については更なる検討に基づき、ケーブル外径やその構造などと見かけの空気層厚さの関係性について、明確にする必要があると考える。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京理科大学　辻本誠教授には大変お世話になりました。研究に関わることのみならず、私生活の上でも様々な面でご指導やアドバイスをいただき、また諸外国との学術交流や国際会議、国内外のシンポジウム、学術委員会の補助など、辻本研究室での 3 年間に亘って、数え切れないほど貴重な機会を与えて頂きました。研究生活においては、期日ギリギリで対応することも多く、たくさんのお手間をお掛けしたことと思います。この場を借りてお詫びを申し上げるとともに、心からの御礼を申し上げます。

本研究を進めるにあたり、東京理科大学　松山賢准教授からは、主に副査の立場として、研究に関するご指導をいただきました。また私自身の進路についても、多大なるご支援をいただき、3 年間に亘って様々な学びをいただきました。この場を借りてお礼を申し上げます。

本研究を進めるにあたり、中部電力株式会社　奈良間雄さま、ならびに一般財団法人電力中央研究所　白井孝治さまには、主に火災実証試験のデータ提供に関しまして、多大なるご支援をいただきました。おかげさまで何とか論文としての形は整いましたが、提供を受けた全データを扱うことは叶いませんでした。ここにお詫びの気持ちと感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、東京理科大学　内田英健先生には、主に授業を通じてシミュレーションの基礎を教えていただきました。ここに記して謝意を表します。

また、東京理科大学辻本研究室の西田幸夫先生、ならびに研究室秘書の前川結宇理さまには、研究に関する相談や、研究室ゼミでの議論、大学の事務手続きに関するサポートなど、様々な面で大変お世話になりました。この場を借りて、御礼を申し上げます。

その他、日本火災学会学術専門委員会「原子力発電所の火災防護専門委員会」委員の皆様方、東京理科大学技術者　沖永誠治さま、国際火災科学研究科など関わりのあった全ての方々へ対して、この場を借りて心からのお礼を申し上げます。

最後に、筆者の能力は決して優れているとは思えませんが、何かしらのご縁と関係者の皆様方のおかげで、原子力発電所の火災防護に関して、今後も安全研究を推進していく役職を獲得するに至りました。したがって、これらの重大な課題に対しては、並々ならぬ使命感とともに、筆者の人生をかけて取り組んでいく次第です。引き続きの変わらぬご指導ご鞭撻のほど、何卒よろしくお願い申し上げます。

2016 年 3 月

Appendix

付録 A　難燃ケーブルについて

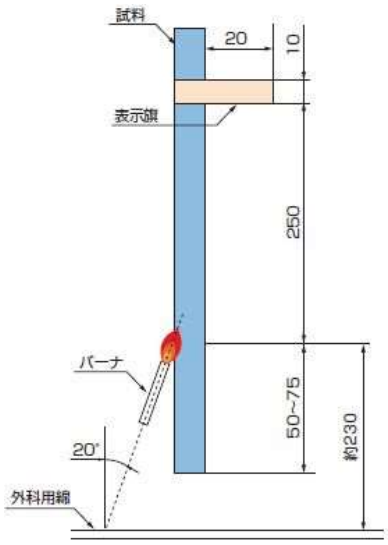
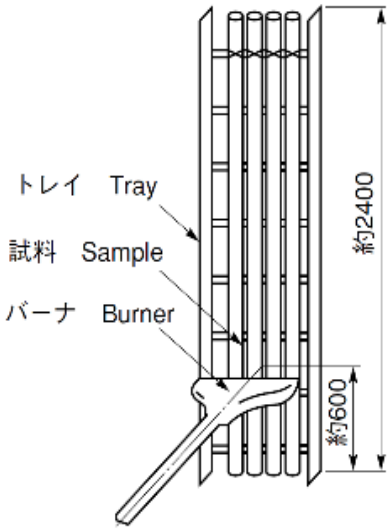
難燃ケーブルについては、『「火災により着火し難く、著しい燃焼をせず、また、加熱源を除去した場合はその燃焼部が広がらない性質」を有していることが、延焼性及び自己消火性の実証試験により示されていること』、というような NRA による定義がなされている。

（実証試験の例）

・自己消火性の実証試験…UL 垂直燃焼試験（UL1589 VW-1）

・延焼性の実証試験…IEEE383 または IEEE1202

表 73　難燃ケーブルの性能実証試験

自己消火性：UL 垂直燃焼試験（UL1589 VW-1） （一条ケーブル燃焼試験）		延焼性：IEEE383 または IEEE1202 （多条ケーブル燃焼試験）	
試験方法		試験方法	
試験内容	・試料を垂直に保持し、20 度の角度でバーナの炎（バーナ熱量 2.14 MJ/h）をあてる。 ・15 秒着火、15 秒休止を 5 回繰り返し、試料の燃焼の程度を確認する。	試験内容	・試料を規定の間隔で垂直トレイに布設し、バーナの炎（バーナ熱量 70,000 BTU/h「約 73 MJ/h※」）を用いて 20 分間加熱する。 ・20 分経過後、バーナの燃焼を停止し、試料の燃焼の程度を確認する。
判断基準	・残炎による燃焼が 60 秒を超えない。 ・表示旗が 25%以上焼損しない。 ・落下物により底部の外科用綿が燃焼しない。	判断基準	・3 回の試験のいずれにおいても、ケーブルはバーナ停止後に自己消火し、かつケーブルのシースおよび絶縁体の最大損傷長さが 1800 ㎜未満であること。

※　1 BTU＝1055 J として換算。

付録 B　オイラー陽解法（FTCS 法：Forward Time Central Space 法）の解説

まず、基本式の時間に関する項へ対して前進差分法を適用すると、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{r,n+1} - T_{r,n}}{\Delta t}$$

また、空間に関する項へ対して中心差分法を適用すると、

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_{r+1,n} - T_{r-1,n}}{2\Delta r}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{\frac{T_{r+1,n} - T_{r,n}}{\Delta r} - \frac{T_{r,n} - T_{r-1,n}}{\Delta r}}{\Delta r} = \frac{T_{r+1,n} - 2T_{r,n} + T_{r-1,n}}{\Delta r^2}$$

ここで半径 R を N 等分割して、円筒内部を i=0、円筒外面を i=N とし、空間刻みを i、時間刻みを j とすると、基本式の差分方程式は以下の通りとなる。

$$\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t} = \alpha \cdot \left\{ \frac{1}{r} \cdot \left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2\Delta r} \right) + \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{\Delta r^2} \right\}$$

また、$r = i \cdot \Delta r$ となることから

$$\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t} = \frac{\alpha}{\Delta \mathrm{r}^2} \cdot \left\{ \left(1 + \frac{1}{2i}\right) \cdot T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + \left(1 - \frac{1}{2i}\right) \cdot T_{i-1,j} \right\}$$

以上のことから $T_{i,j+1}$ について整理すると、以下の近似式を得ることができる。

$$T_{i,j+1} = T_{i,j} + \frac{\alpha \cdot \Delta t}{\Delta \mathrm{r}^2} \cdot \left\{ \left(1 + \frac{1}{2i}\right) \cdot T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + \left(1 - \frac{1}{2i}\right) \cdot T_{i-1,j} \right\}$$

参考文献

1）河村哲也：数値計算入門，pp.239~244，インデックス出版，2012 年 04 月 29 日初版第１刷，
https://books.google.co.jp/books/about/%E6%95%B0%E5%80%A4%E8%A8%88%E7%AE%97%E5%85%A5%E9%96%80.html?id=dSERuwAACAAJ&source=kp_cover&redir_esc=y

付録Ｃ　簡易予測モデルの境界条件の考え方

本附則は本文第 5 章の 1-3 節を補足するものである。以降では、i=0（導体の表面）における境界条件の考え方について詳述する。微小時間δｔの間における導体内部の温度上昇を考えると、内部エネルギーの変化量ΔU[kJ]は以下の式で表わされる。

$$\Delta \mathrm{U} = \rho_c c_c V_c \left(T_{c,j+1} - T_{c,j}\right)$$

ここに、ρ_c は導体の密度[kg/m^3]、c_c は導体の比熱[kJ/kg K]、V_c は導体の体積[m^3]、$T_{c,j+1}$ は時刻 t+δｔにおける導体の温度[K]、$T_{c,j}$ は時刻ｔにおける導体の温度[K]である。

また、微小時間δｔの間における導体のジュール熱 $E_{t+\delta t}$[kJ]については、以下の式で表わされる。

$$E_{t+\delta t} = 0.001 \cdot {I_{j+1}}^2 \cdot R_j \cdot \delta t$$

ここに、I_{j+1} は時刻 t+δｔにおける導体の電流値[A]、R_j は時刻ｔにおける導体の抵抗値[Ω]である。

さらに、微小時間δｔの間における導体から絶縁体内部への熱伝導による放熱量 Q_{loss} を考えると、以下の式で表わされる。

$$Q_{loss} = -k_1 \frac{\left(T_{c,j} - T_{1,j}\right)}{\delta r} \cdot 2\pi r_c \cdot L \cdot \delta t$$

ここに、k_1 は絶縁体の熱伝導率[kW/mK]、$T_{1,j}$ は時刻ｔにおける絶縁体の内部温度[K]、r_c は導体の半径[m]、L は導体の長さ[m]である。

以上より、導体の表面における熱量保存を考えると、

$$\Delta \mathrm{U} = E_{t+\delta t} + Q_{loss}$$

$$\rho_c c_c V_c \left(T_{c,j+1} - T_{c,j}\right) = 0.001 \cdot {I_{j+1}}^2 \cdot R_j \cdot \delta t - k_1 \frac{\left(T_{c,j} - T_{1,j}\right)}{\delta r} \cdot 2\pi r_c \cdot L \cdot \delta t$$

この式を $T_{c,j+1}$ について整理すると、

$$T_{c,j+1} = T_{c,j} + \frac{\delta t}{\rho_c c_c V_c} \cdot \left(0.001 \cdot {I_{j+1}}^2 \cdot R_j - k_1 \frac{\left(T_{c,j} - T_{1,j}\right)}{\delta r} \cdot 2\pi r_c \cdot L\right)$$

i=N（外装の表面）における境界条件については、それぞれ以下の通りとする。ここで、時間刻み幅Δtを十分に小さくすると、伝熱の形態については準定常状態と同様に扱うことができるため、絶縁体の表面と大気の間における熱流束は、絶縁体の内部から移動してくる熱流束と等しい、と考えることができる。i=N における境界条件は、総合熱伝達率を h とし、シースの熱伝導率を k_2 とすると、

$$-\boldsymbol{k_2}\cdot\frac{\boldsymbol{T_{N-1,j}}-\boldsymbol{T_{N,j}}}{\boldsymbol{\delta r}}=-\mathbf{h}\cdot\left(\boldsymbol{T_{N,j}}-\boldsymbol{T_{air}}\right)$$

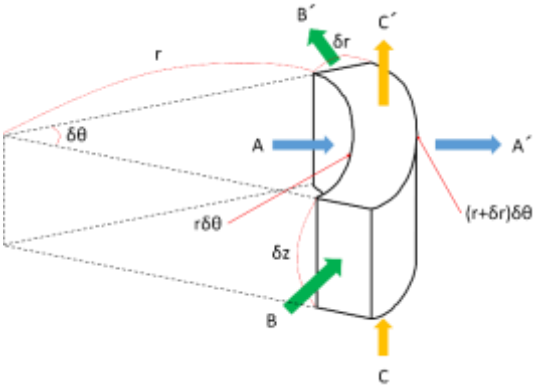
この式を $T_{N,j}$ について、整理すると、

$$\boldsymbol{T_{N,j}}=\left(\frac{\boldsymbol{h}}{\boldsymbol{h}+\frac{\boldsymbol{k_2}}{\boldsymbol{\delta r}}}\right)\cdot\boldsymbol{T_a}+\left(\frac{\frac{\boldsymbol{k_2}}{\boldsymbol{\delta r}}}{\boldsymbol{h}+\frac{\boldsymbol{k_2}}{\boldsymbol{\delta r}}}\right)\cdot\boldsymbol{T_{N-1,j}}$$

となる。

付録 D　円筒座標系熱伝導方程式の導出

本論文の第五章では、円柱座標系の熱伝導方程式を基本式とし、ケーブルの内部温度上昇履歴を近似的に計算している。したがって本附則では、円柱座標系における熱伝導方程式の導出過程について、詳細な解説を加えることにする。



はじめに、上図のような円柱の一部を考える。この部分体積 V については、以下のように表すことができる。

$$V = \pi(r+\delta r)^2 \cdot \frac{\delta\theta}{2\pi} \cdot \delta z - \pi r^2 \cdot \frac{\delta\theta}{2\pi} \cdot \delta z$$

$$= \frac{\delta\theta \cdot \delta z}{2}(r^2 + 2r\delta r + \delta r^2) - \frac{\delta\theta \cdot \delta z}{2} \cdot r^2$$

$$= r\delta r\delta\theta\delta z + \frac{1}{2}\delta r^2 \delta\theta\delta z$$

ここで空間刻み幅（$\delta r, \delta\theta, \delta z$）の大きさは十分に小さいものとみなし、**4 次元以上の空間刻み幅の積をゼロと考える**と、上式は以下のように変形することができる。

$$V = r\delta r\delta\theta\delta z + \cancel{\frac{1}{2}\delta r^2 \delta\theta\delta z}$$

$$\approx r\delta r\delta\theta\delta z$$

したがって、以降の体積 V（検査空間 CV）には、$V = r\delta r\delta\theta\delta z$を適用することにする。

D-1　半径 r 方向

まず、半径方向の熱量収支について、微小時間δt の間における図中 A 面および A´ 面の熱の移動を考える。

微小時間δt の間において A 面から検査空間 CV 内へ流入する熱量Q_Aは、フーリエの法則より、以下のように導くことができる。

$$Q_A = -k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r} \cdot r\delta\theta\delta z \cdot \delta t$$

ここで k：熱伝導率【kW/mK】とする。

また、微小時間δt の間において A´ 面で検査空間 CV 内から流出する熱量$Q_{A'}$は、同様にして以下の通りに表すことができる。

$$Q_{A'} = -k\frac{\partial T(r+\delta r,\theta,z;t)}{\partial r} \cdot (r+\delta r)\delta\theta\delta z \cdot \delta t$$

ここで、$T(r+\delta r,\theta,z;t)$ について、

$$T(r+\delta r,\theta,z;t) = T(r,\theta,z;t) + \frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r} \cdot \delta r$$

のように変形すると、上式は以下の通りになる。

$$Q_{A'} = -k\frac{\partial T(r+\delta r,\theta,z;t)}{\partial r} \cdot (r+\delta r)\delta\theta\delta z \cdot \delta t$$

$$= -k\frac{\partial}{\partial r}\left(T(r,\theta,z;t) + \frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r} \cdot \delta r\right) \cdot (r+\delta r)\delta\theta\delta z \cdot \delta t$$

$$= -k\left\{\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial r^2} \cdot \delta r\right\} \cdot (r+\delta r)\delta\theta\delta z \cdot \delta t$$

$$= -k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r} \cdot r\delta\theta\delta z\delta t - k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r} \cdot \delta r\delta\theta\delta z\delta t$$

$$- k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial r^2} \cdot r\delta r\delta\theta\delta z\delta t$$

$$\cancel{- k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial r^2} \cdot \delta r^2\delta\theta\delta z\delta t}$$

$$= -k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r} \cdot r\delta\theta\delta z\delta t - k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r}$$

$$\cdot \delta r\delta\theta\delta z\delta t - k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial r^2}$$

$$\cdot r\delta r\delta\theta\delta z\delta t$$

以上のことから、検査空間 CV 内に流入する正味の熱量$Q_{A,net}$は$Q_A - Q_{A'}$で与えられることから、以下のように表すことができる。

$$Q_{A,net} = Q_A - Q_{A'}$$

$$= -k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r}\cdot r\delta\theta\delta z\cdot\delta t$$

$$-\left(-k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r}\cdot r\delta\theta\delta z\delta t - k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r}\right.$$

$$\left.\cdot\,\delta r\delta\theta\delta z\delta t - k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial r^2}\cdot r\delta r\delta\theta\delta z\delta t\right)$$

$$= k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r}\cdot\delta r\delta\theta\delta z\delta t + k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial r^2}\cdot r\delta r\delta\theta\delta z\delta t$$

$$= k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r}\cdot\frac{1}{r}V\delta t + k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial r^2}V\delta t$$

なお、上式は、$V = r\delta r\delta\theta\delta z$を用いて式を変形していることに留意されたい。

D-2　周θ方向

次に周方向の熱量収支について、微小時間δtの間における図中B面およびB´面の熱の移動を考える。

微小時間δtの間においてB面から検査空間CV内へ流入する熱量Q_Bは、フーリエの法則より、以下のように導くことができる。

$$Q_B = -k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta}\cdot\frac{1}{r}\delta r\delta z\cdot\delta t$$

ここで、周方向の距離は、r$\delta\theta$となることに留意されたい。

また、微小時間δtの間においてB´面で検査空間CV内から流出する熱量$Q_{B'}$は、同様にして以下の通りに表すことができる。

$$Q_{B'} = -k\frac{\partial T(r,\theta+\delta\theta,z;t)}{\partial\theta}\cdot\frac{1}{r}\delta r\delta z\cdot\delta t$$

ここで、$T(r,\theta+\delta\theta,z;t)$について、

$$T(r,\theta+\delta\theta,z;t) = T(r,\theta,z;t) + \frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta}\cdot\frac{1}{r}\cdot r\delta\theta$$

$$= T(r,\theta,z;t) + \frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta}\cdot\delta\theta$$

のように変形すると、上式は以下の通りになる。

$$Q_{B'} = -k\frac{\partial T(r,\theta+\delta\theta,z;t)}{\partial\theta}\cdot\frac{1}{r}\delta r\delta z\cdot\delta t$$

$$= -k\frac{\partial}{\partial\theta}\left(T(r,\theta,z;t) + \frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta}\cdot\delta\theta\right)\cdot\frac{1}{r}\delta r\delta z\delta t$$

$$= -k\left\{\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta} + \frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta^2}\cdot\delta\theta\right\}\cdot\frac{1}{r}\delta r\delta z\cdot\delta t$$

$$= -k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta}\cdot\frac{1}{r}\delta r\delta z\delta t - k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta^2}$$

$$\cdot\frac{1}{r}\delta r\delta\theta\delta z\delta t$$

以上のことから、検査空間CV内に流入する正味の熱量$Q_{B,net}$は$Q_B - Q_{B'}$で与えられることから、以下のように表すことができる。

$$Q_{B,net} = Q_B - Q_{B'}$$

$$= -k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta}\cdot\frac{1}{r}\delta r\delta z\cdot\delta t$$

$$-\left(-k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta}\cdot\frac{1}{r}\delta r\delta z\delta t\right.$$

$$\left.-\,k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta^2}\cdot\frac{1}{r}\delta r\delta\theta\delta z\delta t\right)$$

$$= k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta^2}\cdot\frac{1}{r}\delta r\delta\theta\delta z\delta t$$

$$= k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta^2}\cdot\frac{1}{r^2}V\delta t$$

なお、上式は、$V = r\delta r\delta\theta\delta z$を用いて式を変形していることに留意されたい。

D-3　高さ（長さ）z方向

次に高さ方向の熱量収支について、微小時間δtの間における図中C面およびC´面の熱の移動を考える。

微小時間δtの間においてB面から検査空間CV内へ流入する熱量Q_Cは、フーリエの法則より、以下のように導くことができる。

$$Q_C = -k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial z}\cdot\left(r\delta r\delta\theta + \frac{1}{2}\delta r^2\delta\theta\right)\cdot\delta t$$

また、微小時間δtの間においてC´面で検査空間CV内から流出する熱量$Q_{C'}$は、同様にして以下の通りに表すことができる。

$$Q_{C'} = -k\frac{\partial T(r,\theta,z+\delta z;t)}{\partial z} \cdot \left(r\delta r\delta\theta + \frac{1}{2}\delta r^2\delta\theta\right)\cdot\delta t$$

ここで、$T(r,\theta,z+\delta z;t)$について、

$$T(r,\theta,z+\delta z;t) = T(r,\theta,z;t) + \frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial z}\cdot\delta z$$

のように変形すると、上式は以下の通りになる。

$$Q_{C'} = -k\frac{\partial T(r,\theta,z+\delta z;t)}{\partial z} \cdot \left(r\delta r\delta\theta + \frac{1}{2}\delta r^2\delta\theta\right)\cdot\delta t$$

$$= -k\frac{\partial}{\partial z}\left(T(r,\theta,z;t) + \frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial z}\cdot\delta z\right)\cdot\left(r\delta r\delta\theta + \frac{1}{2}\delta r^2\delta\theta\right)\cdot\delta t$$

$$= -k\left\{\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial z} + \frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial z^2}\cdot\delta z\right\} \cdot\left(r\delta r\delta\theta + \frac{1}{2}\delta r^2\delta\theta\right)\cdot\delta t$$

以上のことから、検査空間 CV 内に流入する正味の熱量 $Q_{C,net}$は$Q_C - Q_{C'}$で与えられることから、以下のように表すことができる。

$$Q_{C,net} = Q_C - Q_{C'}$$

$$= -k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial z}\cdot\left(r\delta r\delta\theta + \frac{1}{2}\delta r^2\delta\theta\right)\cdot\delta t - \left\{-k\left(\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial z} + \frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial z^2}\cdot\delta z\right) \cdot\left(r\delta r\delta\theta + \frac{1}{2}\delta r^2\delta\theta\right)\cdot\delta t\right\}$$

$$= k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial z^2}\cdot\delta z\cdot\left(r\delta r\delta\theta + \frac{1}{2}\delta r^2\delta\theta\right)\cdot\delta t$$

$$= k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial z^2}\cdot r\delta r\delta\theta\delta z\delta t + \cancel{k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial z^2}\cdot\frac{1}{2}\delta r^2\delta\theta\delta z\delta t}$$

$$= k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial z^2}\cdot r\delta r\delta\theta\delta z\delta t$$

$$= k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial z^2}\cdot V\delta t$$

なお、上式は、$V = r\delta r\delta\theta\delta z$を用いて式を変形していることに留意されたい。

D-4　検査空間 CV の温度上昇

微小時間δtの間において、検査空間 CV 内の温度が$T(r,\theta,z;t) \to T(r,\theta,z;t+\delta t)$へ変化したとすると、その変化量$\Delta U$は以下のように表すことができる。

$$\Delta U = \rho c\cdot T(r,\theta,z;t+\delta t)\cdot V - \rho c\cdot T(r,\theta,z;t)\cdot V$$

ここにΔU：検査空間 CV 内部の熱量変化【kJ】，ρ：密度【kg/m3】，c：【kJ/kgK】とする。

D-5　検査空間 CV における熱量保存

以上のことから、検査空間 CV における熱量保存は、$\Delta U = Q_{A,net} + Q_{B,net} + Q_{C,net}$で表すことができるため、

$$\rho c\cdot T(r,\theta,z;t+\delta t)\cdot V - \rho c\cdot T(r,\theta,z;t)\cdot V = k\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r}\cdot\frac{1}{r}V\delta t + k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial r^2}V\delta t + k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta^2}\cdot\frac{1}{r^2}V\delta t + k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial z^2}\cdot V\delta t$$

ここで、両辺を$V\delta t$で割って、それぞれの空間刻み幅（$\delta r,\delta\theta,\delta z \to 0$）、時間刻み幅$\delta t \to 0$の極限をとって整理すると、上式は以下の通りとなる。

$$\rho c\cdot\frac{T(r,\theta,z;t+\delta t) - T(r,\theta,z;t)}{\delta t} = k\cdot\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r} + k\cdot\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial r^2} + k\cdot\frac{1}{r^2}\cdot\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta^2} + k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial z^2}$$

$$\rho c\cdot\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial t} = k\cdot\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T(r,\theta,z;t)}{\partial r} + k\cdot\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial r^2} + k\cdot\frac{1}{r^2}\cdot\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial\theta^2} + k\frac{\partial^2 T(r,\theta,z;t)}{\partial z^2}$$

ここで、$T(r,\theta,z;t)$を関数 T として書き直すと、

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\alpha\cdot\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r^2}\cdot\frac{\partial^2 T}{\partial\theta^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$$

ここにα：熱拡散率【m2/s】である。また、参考書によっては以下の表記も存在する。

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\alpha\cdot\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left(r\cdot\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\cdot\frac{\partial^2 T}{\partial\theta^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$$

（補足：別解）円柱座標系への座標変換

ここでは、非定常の円柱座標系熱伝導方程式について、直交座標系からの座標変換を用いた導出方法を解説する。なお、その基本式は以下の通りである。

基本式

・直交座標系

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$$

・円柱座標系

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\alpha\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left(r\cdot\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\cdot\frac{\partial^2 T}{\partial\theta^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$$

式の導出

まず直交座標(x,y)について、極座標(r,θ)への変換を考えると、

$$x=r\cos\theta\,,y=r\sin\theta$$

となる。これらについてそれぞれ両辺をrとθで偏微分すると、

$$\frac{\partial x}{\partial r}=\cos\theta\,,\frac{\partial x}{\partial\theta}=-r\sin\theta\,,\frac{\partial y}{\partial r}=\sin\theta\,,\frac{\partial y}{\partial\theta}=r\cos\theta$$

1 階偏微分演算子について、上式を用いて求めると、

$$\frac{\partial}{\partial r}=\frac{\partial x}{\partial r}\cdot\frac{\partial}{\partial x}+\frac{\partial y}{\partial r}\cdot\frac{\partial}{\partial y}=\cos\theta\cdot\frac{\partial}{\partial x}+\sin\theta\cdot\frac{\partial}{\partial y}$$

両辺に$r\cos\theta$をかけると、

$$r\cos\theta\cdot\frac{\partial}{\partial r}=r\cos^2\theta\cdot\frac{\partial}{\partial x}+r\sin\theta\cos\theta\cdot\frac{\partial}{\partial y}$$

1 階偏微分演算子について、同様にして、

$$\frac{\partial}{\partial\theta}=\frac{\partial x}{\partial\theta}\cdot\frac{\partial}{\partial x}+\frac{\partial y}{\partial\theta}\cdot\frac{\partial}{\partial y}=-r\sin\theta\cdot\frac{\partial}{\partial x}+r\cos\theta\cdot\frac{\partial}{\partial y}$$

両辺に$\sin\theta$をかけると、

$$\sin\theta\cdot\frac{\partial}{\partial\theta}=-r\sin^2\theta\cdot\frac{\partial}{\partial x}+r\sin\theta\cos\theta\cdot\frac{\partial}{\partial y}$$

以上のことから、整理した式を用いて

$$\frac{\partial}{\partial x}=\cos\theta\cdot\frac{\partial}{\partial r}-\frac{1}{r}\cdot\sin\theta\cdot\frac{\partial}{\partial\theta}$$

また$\frac{\partial}{\partial r}$の両辺に$r\sin\theta$、$\frac{\partial}{\partial\theta}$の両辺に$\cos\theta$をかけて同様に整理すると、

$$\frac{\partial}{\partial y}=\sin\theta\cdot\frac{\partial}{\partial r}+\frac{1}{r}\cdot\cos\theta\cdot\frac{\partial}{\partial\theta}$$

次に 2 階偏微分演算子について、$\frac{\partial}{\partial x}$を用いて整理すると、

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}=\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)\cdot\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)$$

$$=\left(\cos\theta\cdot\frac{\partial}{\partial r}-\frac{1}{r}\cdot\sin\theta\cdot\frac{\partial}{\partial\theta}\right)\cdot\left(\cos\theta\cdot\frac{\partial}{\partial r}-\frac{1}{r}\cdot\sin\theta\cdot\frac{\partial}{\partial\theta}\right)$$

$$=\left(\cos\theta\cdot\frac{\partial}{\partial r}\right)^2+\left(-\frac{1}{r}\cdot\sin\theta\cdot\frac{\partial}{\partial\theta}\right)\cdot\left(\cos\theta\cdot\frac{\partial}{\partial r}\right)+\left(\cos\theta\cdot\frac{\partial}{\partial r}\right)\cdot\left(-\frac{1}{r}\cdot\sin\theta\cdot\frac{\partial}{\partial\theta}\right)+\left(-\frac{1}{r}\cdot\sin\theta\cdot\frac{\partial}{\partial\theta}\right)^2$$

$$=\cos^2\theta\cdot\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{\sin^2\theta}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}-\frac{\sin\theta\cdot\cos\theta}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial\theta}\cdot\left(\frac{\partial}{\partial r}\right)+\frac{\cos\theta\cdot\sin\theta}{r^2}\cdot\frac{\partial}{\partial\theta}-\frac{\cos\theta\cdot\sin\theta}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\cdot\left(\frac{\partial}{\partial\theta}\right)+\frac{\sin^2\theta}{r^2}\cdot\frac{\partial^2}{\partial\theta^2}$$

また、$\frac{\partial}{\partial y}$を用いて同様に整理すると、

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} = sin^2\theta \cdot \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{cos^2\theta}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{cos\,\theta \cdot sin\,\theta}{r}$$

$$\cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial r}\right) - \frac{sin\,\theta \cdot cos\,\theta}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta}$$

$$+ \frac{sin\,\theta \cdot cos\,\theta}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial \theta}\right)$$

$$+ \frac{cos^2\theta}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$$

以上より、基本式を$\frac{\partial^2}{\partial x^2}$と$\frac{\partial^2}{\partial y^2}$を用いて直交座標から円柱座標へ変換し、式の整理を行うと、以下の式を導くことができる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$$

$$= \alpha \left\{\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right\}$$

参考文献

1）日本機械学会：機械工学便覧α-5 熱工学，第 4 章，http://www.jsme.or.jp/publish/books/books_contents/newbinran.html

2）小西克享：Excel による非定常および定常熱計算 version06, 埼玉工業大学工学部機械工学科技術資料，http://www.sit.ac.jp/user/konishi/JPN/

付録Ｅ　最近の話題（中央制御室床下の不適切なケーブル敷設状況について）

【レポート】電力共同研究（昭和 57 年度）パッケージ型制御盤システム
PCPS（Packaged Control Panel System）及び HICAT（Hitachi Cabling Techniques）
の分離性能実証試験

騒動の背景

原子力発電所の再稼働に関する審査対応の中で、柏崎刈羽原子力発電所において、本来の設計仕様とは異なる状態のケーブル敷設が発覚した。今回、問題視されている中央制御室床下のケーブル配線には、PCPS または HICAT と呼ばれる配線方式が採用されている。本来のこれらの配線方法では、常用系と安全系ケーブルについて、水平または垂直の分離板等で確実に分離されているが、この分離板の破損や欠落等に伴い、常用系と安全系の分離が不十分であることが、東京電力の現場作業員によって確認された。

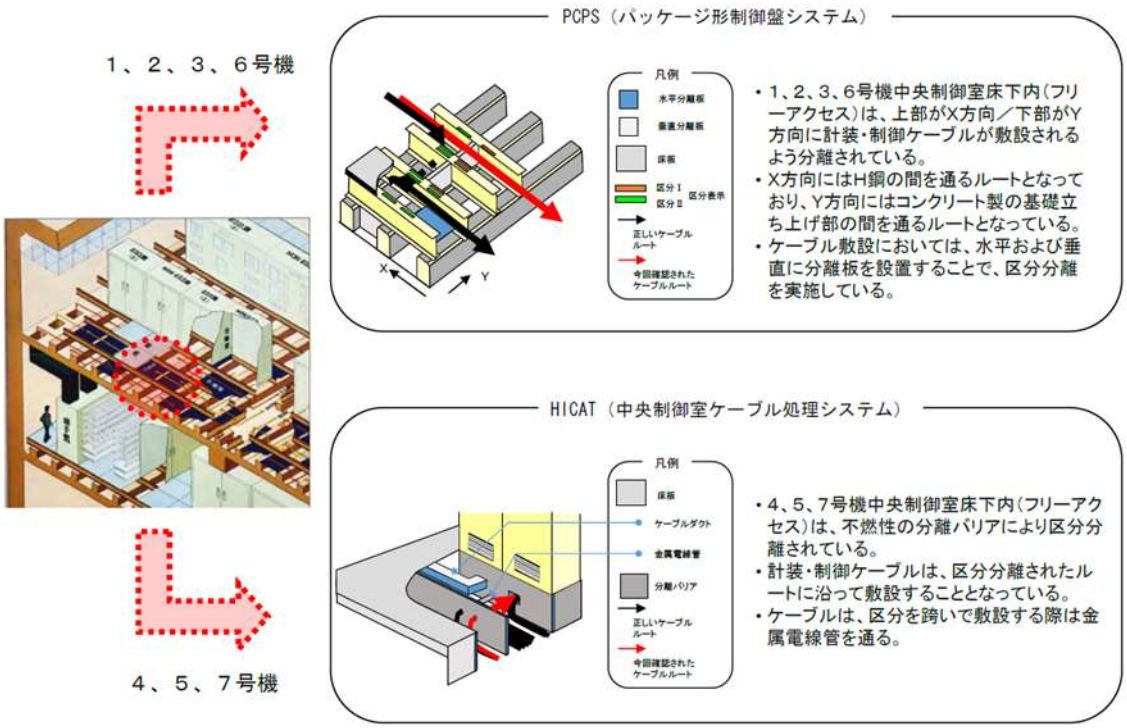


図　中央制御室床下内の構造 [1)]

目的

本レポートの目的は、過去（昭和 57 年度）に電力共同研究の一環として行われた PCPS や HICAT の分離性能実証試験の概要をまとめることである。そのため、上述した 2 つの配線方式についても、それらの基本的な違いを理解できるよう、簡単に触れることにした。また以降の内容については、PCPS および HICAT の概要、各配線方式に関する実証試験の概

要、といった順序でレポートを構成している。

パッケージ型制御盤システム PCPS（Package Control Panel System）[2)]

PCPS とは、制御盤およびケーブル等の分離の徹底により、安全保護系統の冗長性と独立性を確保するために開発された、制御盤下部のケーブル配線方法である。従来では、制御盤の下部にケーブル処理室を設けていた。しかしながら PCPS の場合は、アセンブルフロアにケーブルを収納することによって、ケーブル処理室を縮小することができ、スペースの有効化を図ることが可能となる。以下、PCPS の構成を表に示した。

表 74　PCPS の構成

構成要素	概要
制御盤	分離区分に従い、中央制御室に配置する。
端子盤	中央制御室に引き込まれる現場機器のケーブルを一度端子盤に集合し、中央制御盤と端子盤の間は、プレハブケーブル等で接続する。
アセンブルフロア（ケーブルピット）	中央制御室の床下に制御盤と平行に走る区割りした通路とそれと立体的に直交して走る通路を設け、ケーブルを収納し、異区分の分離を徹底する。
コネクタ	プレハブケーブルの両端に端子を圧着接続し、盤間を接続する。
プレハブケーブルの自動算出	アセンブルフロアとケーブルに関するデータを入力し、ケーブルルート及びケーブル長を自動的に算出する。

中央制御室ケーブル処理システム HICAT（Hitachi Cabling Techniques）[2),3)]

HICAT とは、プラント運転の中央集中化、自動化、計算機化に伴い、制御配線を合理的に処理する必要が生じたため、現場での配線作業量の均一化、多芯化及び分離手法の向上を図るために開発された、中央制御室におけるケーブルの配線方法である。従来では、制御盤と現場機器の間を直接結線していた。しかしながら HICAT の場合は、中央制御室内に中央側端子盤（CTC）、現場側に現場端子盤（LTC）を設け、制御盤⇔CTC⇔LTC⇔現場機器の区間について、それぞれの室側にある端子盤に集中配線し、かつ多芯ケーブルを用いることで、ケーブルの総敷設量を軽減できるメリットがある。以下、HICAT の構成を表に示した。

表 75　HICAT の構成

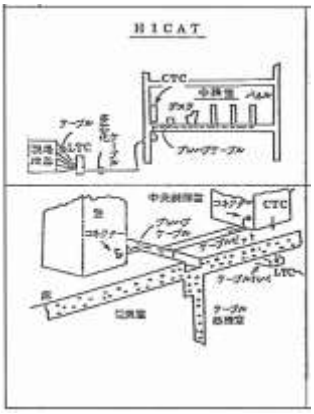
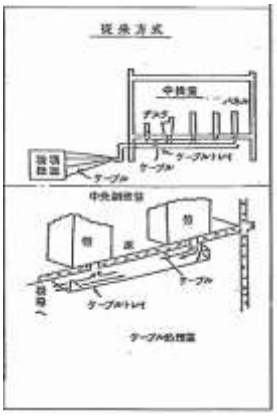
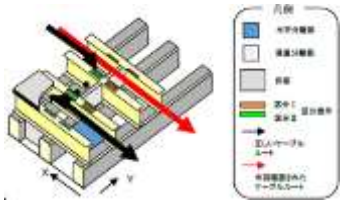
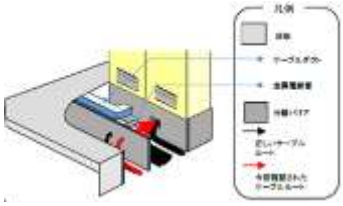
構成要素	概要
制御盤	（分離区分に従い？）中央制御室に配置する。
中央側端子盤（CTC）	中央制御室に中央側端子盤（CTC）を設置する。中央制御盤と CTC の間は、プレハブケーブル等で接続する。CTC と現場端子盤（LTC）の間は、多芯化されたプレハブケーブル等で接続する。
現場端子盤（LTC）	現場側に現場端子盤を設置する。中央制御室に引き込まれる現場機器のケーブルをコネクタ付プレハブケーブル等で接続する。CTC と LTC の間は、多芯化されたプレハブケーブル等で接続する。

コネクタ	プレハブケーブルの両端に端子を圧着接続し、盤間を接続する。
ケーブル	中央制御室の場合は、床下へ設けたピット内に配線、現場の場合は、ケーブルトレイ等で配線する。

PCPS と HICAT の違い

上述した内容からわかるように、両者の配線方法では、ケーブルを多芯化すること、現場機器のケーブルを一度端子盤に集合させる、などの考え方が共通している。しかし、PCPS の場合は、ケーブルを収納するアセンブルフロア（ケーブルピット）が立体格子状に 2 層で構成されていること、HICAT の場合は、現場端子盤と制御盤の間に中央側端子盤を設けている（PCPS の場合、おそらく中央側端子盤は存在しない）点が大きく異なっている。したがって、これらの配線方法には、中央制御室床下部分の構造に大差がある、と考えてよいだろう。2 つの配線方式と従来方式の相違点については、以下の表へ示した。

表 76　各配線方式の比較

配線方式	PCPS	HICAT	従来方式
概略図			
床下構造			
主な特徴	・床下部に立体交差するケーブルピットが存在 ・各ピット（X-Y 方向）間の分離性は分離板により確保 ・（現場）端子盤のみ存在	・床下部にケーブルピットが存在 ・原則として、各ピットは独立性を有する ・ピット内の分離性は分離バリアにより確保 ・現場と中央側に端子盤が存在	・現場機器のケーブルは、端子盤を中継することなく、制御盤へ直接結線

PCPS に関する試験概要

中央制御室の床下に存在するケーブルは、ほとんどが制御ケーブルである。そのため、当該ケーブル（難燃性 CV ケーブル，導体断面積 2 ㎟×5 芯）を試験体とし、PCPS の床下を模擬した上部ケーブルピット、および下部ケーブルピットの分離性を評価するため、昭和 57 年度に実証試験が行われている。以下、実験条件と各試験に用いられた試験装置の全体像について、表へ示した。

表 77　PCPS の分離性能実証試験

試験名称	水平方向の分離性確認試験	垂直方向の分離性確認試験	盤立上り部分の分離性確認試験
試験体ケーブル	難燃性 CV ケーブル （導体サイズ 2 ㎟×5 芯）	左に同じ	左に同じ
想定火源 (Design Fire)	・タービン油 500ml に浸したさらし（300 ㎜×1000 ㎜×3 枚）、新聞紙（10 枚、まり状に丸めたもの）にケーブルの過電流で着火	・左に同じ	・左に同じ
測定項目	・区分内雰囲気温度 ・I 鋼表面温度 ・コンクリート表面温度 ・床蓋または分離板表面温度	・区分内雰囲気温度 ・I 鋼表面温度 ・分離板表面温度	・区分内雰囲気温度 ・盤内雰囲気温度 ・I 鋼表面温度
分離性の判断結果	問題なし。 ・他区分のケーブルに機能喪失が見られず、I 鋼またはコンクリートの表面温度にも著しい温度上昇は確認されなかった	問題なし。 ・左に同じ	問題なし。 ・左に同じ

※　想定火源については、IEEE383 のリボンガスバーナー（7000BTU／hr×20 分）と比較して、想定火源の発生エネルギーが高いことを確認している。

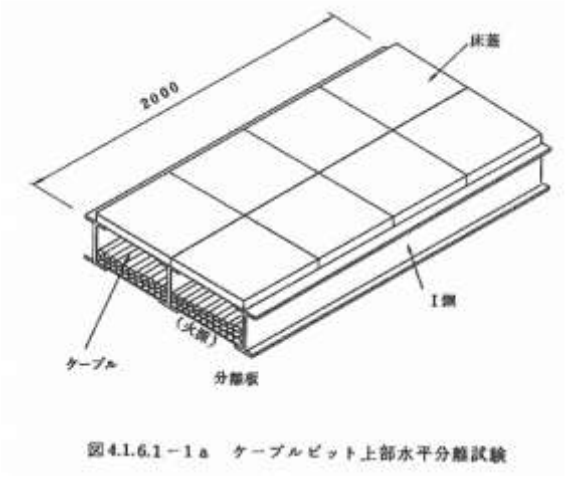


図4.1.6.1－1 a　ケーブルピット上部水平分離試験

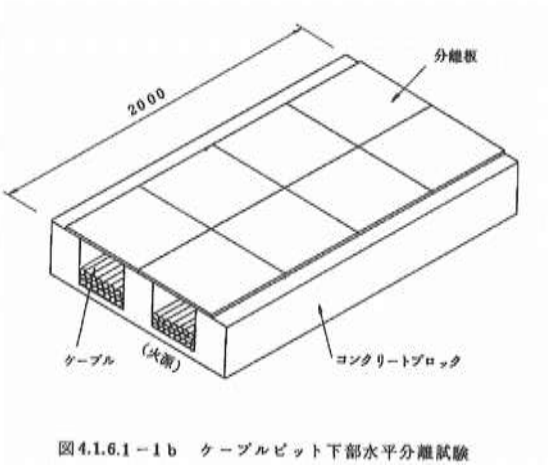


図4.1.6.1－1 b　ケーブルピット下部水平分離試験

図　①水平方向の分離性確認試験装置

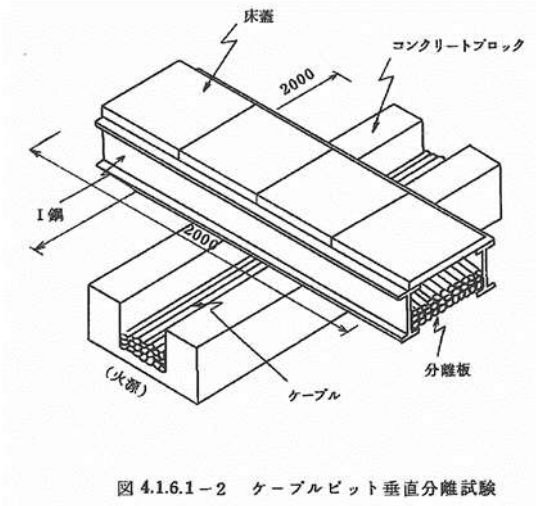


図 4.1.6.1－2　ケーブルピット垂直分離試験

図　②垂直方向の分離性確認試験装置

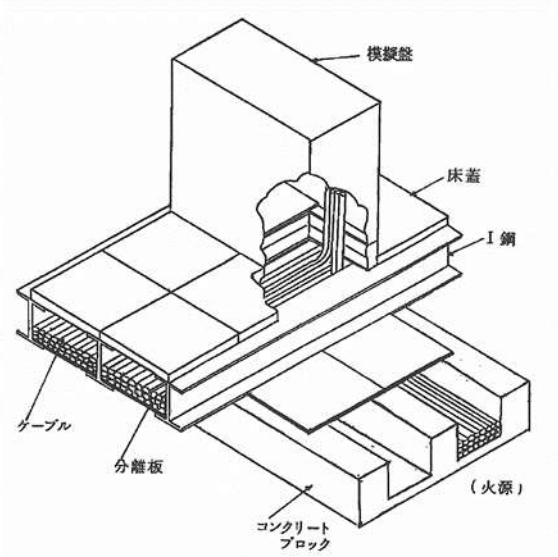


図　③盤立上り部分の分離性確認試験装置

PCPS に関する主な試験結果としては、以下のことが挙げられる。

1. 上部ケーブルピット及び下部ケーブルピットについて、水平方向の分離性は確保されている。
2. 上部ケーブルピット及び下部ケーブルピットについて、垂直方向の分離性は確保されている。
3. 盤立上り部のケーブルピット間の水平方向および垂直方向の分離性は確保されている。
4. 当該範囲の火災に対して、可搬式消火器の有効性が確認された。

HICAT に関する試験概要

HICAT 方式の床下ピットは、原則として安全系区分ごとに独立としている。従って、安全区分同士の分離性の確認が不要であることから、本試験の目的は、同一ピット内のケーブル、ダクト間での延焼性を確認することである。以下、実験条件と各試験に用いられた試験装置の全体像について、表へ示した。

表　HICAT の分離性能実証試験

試験名称	水平分離性の確認試験	垂直分離性の確認試験	盤立上り部の分離性確認試験
試験体ケーブル	難燃性 CV ケーブル （導体サイズ 2 ㎟×5 芯）	左に同じ	左に同じ
想定火源 (Design Fire)	・タービン油 500ml に浸したさらし（300 ㎜×1000 ㎜×3 枚）、新聞紙（10 枚、まり状に丸めたもの）にケーブルの過電流で着火	・左に同じ	・左に同じ
測定項目	・ピット内天井部雰囲気温度 ・火源ダクト内ケーブルシース温度 ・隣接ダクト内ケーブルシース温度	・ピット内天井部雰囲気温度 ・火源ダクト内ケーブルシース温度 ・上部ダクト内ケーブルシース温度	・火源内ケーブルシース温度 ・盤内立上りケーブルシース（上部）温度 ・盤内立上りケーブルシース（下部）温度
分離性の判断結果	問題なし。 ・他区分のケーブルに機能喪失が見られず、I 鋼またはコンクリートの表面温度にも著しい温度上昇は確認されなかった	問題なし。 ・左に同じ	問題なし。 ・左に同じ

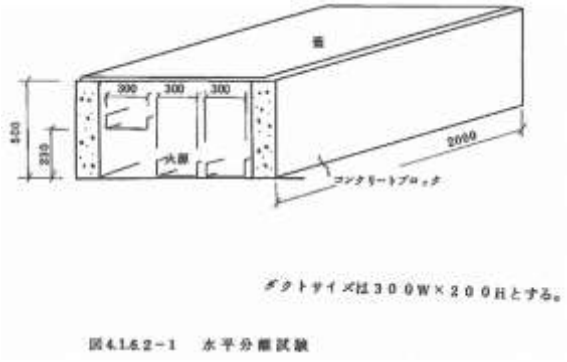


図　水平分離性の確認試験装置

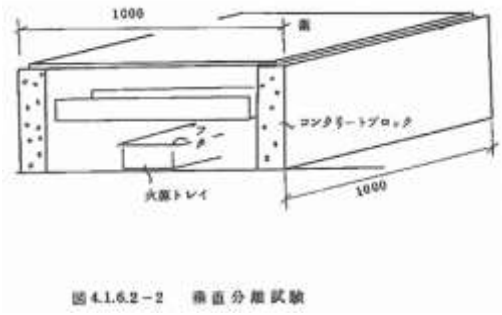


図　垂直分離性の確認試験装置

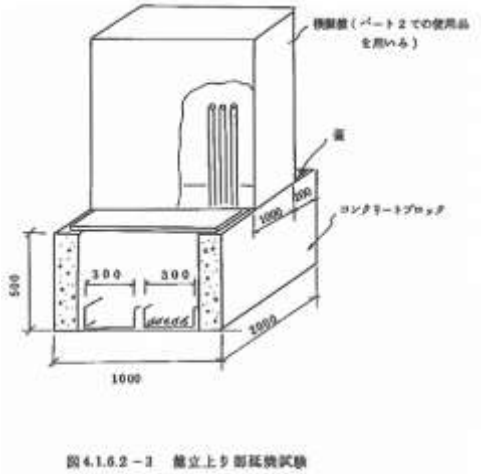


図　盤立上り部の分離性確認試験装置

HICAT に関する主な試験結果は以下の通りである。

1. HICAT 床下ケーブルピット内の火災は、強制的着火をしても、火災源として用いた可燃物の燃焼完了と共に自然鎮火をし、床下ケーブルピット内の火災拡大、火災延焼は生じないことが確認された。
2. 火源ケーブルダクトと隣接する（水平方向, 鉛直方向）ダクト内のケーブルは、火災による影響を受けず、機能の喪失も見られないことを確認した。
3. 床下ケーブルピット内の火災から制御盤内への火災延焼がないことを確認した。
4. 当該範囲の火災に対して、可搬式消火器が有効であることを確認した。

備考

※ 床蓋または分離板の表面温度は、最高で 205℃まで上昇することが確認されている。

※ 想定火源については、「ピット内に新聞紙等を忘れて油をこぼした時に、ケーブルで短絡が発生した。」という予想され難い条件であることが記載されている。

※ 常用系と安全系の区分をケーブルが跨ぐ場合は、金属管で保護する必要がある。

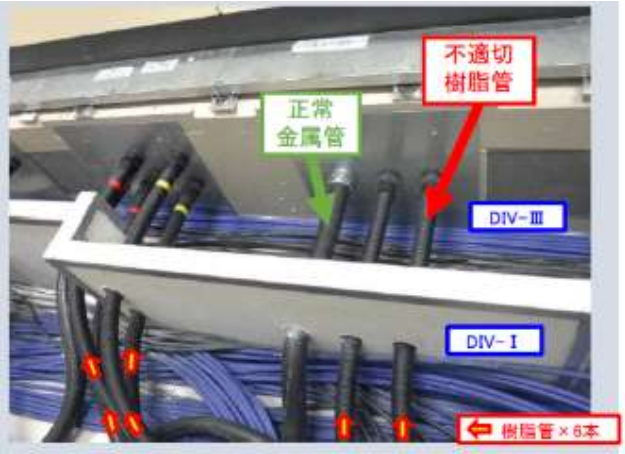


図　金属管の施工例

柏崎刈羽原発の騒動に関する疑問点

本レポートでまとめた PCPS や HICAT 方式の実証試験では、水平方向の分離性について、コンクリート壁または I 鋼を用いた場合の分離性能の評価が行われている。しかしながら、分離板を用いた水平方向の分離性能の確認は、行われていないと思われる（少なくとも、HICAT に採用されている分離バリアを用いた実証試験は、昭和 57 年度の試験内容に含まれていない）。そのため、「PCPS 方式の試験は非火災区分の両端を蓋で閉じた状態」、「HICAT 方式の試験はピット内に 3 列のケーブルダクトを敷設した状態」で火災試験を行っていることから、「PCPS 方式は分離板を用いることで、各系統間の分離性能を確保できる」、「HICAT 方式は分離バリアを用いることで、各系統間の分離性能を確保できる」というような工学的判断や、「分離板または分離バリアの分離性能は、コンクリート壁または I 鋼と同等である」というような別の実証試験が予想されるが、そのような事実について、昭和 57 年度の実証試験報告書 [2)]内には記載されていない。

図　PCPS 方式の正しい水平分離状況

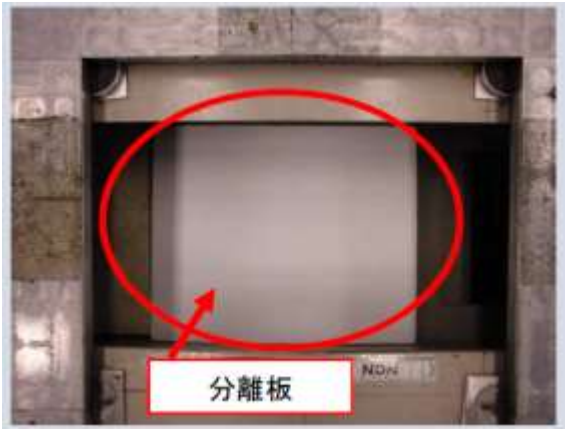


図　PCPS 方式の正しい垂直分離状態

図　HICAT 方式の正しい水平分離状況

参考文献

1）東京電力株式会社：柏崎刈羽原子力発電所における不適切なケーブルの敷設に係る対応について（報告），平成 27 年（2015）11 月 30 日，原子力規制委員会 HP，https://www.nsr.go.jp/data/000131578.pdf

2）電力共同研究：ケーブル及び制御盤火災に関する実証研究，Part-2「制御盤火災に関する実証研究」，昭和 57 年 09 月

3）江頭一晃ほか：原子力発電プラント建設工程の短縮及び管理，1982 年 08 月，日立評論，http://www.hitachihyoron.com/jp/pdf/1982/08/1982_08_11.pdf#search='HICAT+%E5%8E%9F%E5%AD%90%E5%8A%9B'