

解説 記事

浜岡原子力発電所における 火災防護対策への取り組み

中部電力株式会社

奈良間 雄 Takeshi NARAMA

1. はじめに

新規制基準として原子力発電所の火災防護（内部火災）審査基準が、一昨年6月に原子力規制委員会のもとに制定された。原子炉施設は、火災によりその安全性が脅かされることがないように、適切な火災防護対策を施しておく必要がある。新基準では、**火災の発生防止**を示すとともに、**火災の感知及び消火**、並びに**火災の影響軽減**を取り入れている。

ここでは、新規制基準を踏まえ、浜岡原子力発電所において取り組んでいる火災防護対策の特徴について紹介する。

審査基準の基本事項と3方策の概要を、図1に示す。

3方策の意図しているところは・・・

新基準での3方策は、**火災の発生防止**、**火災の感知及び消火**、**火災の影響軽減**である。これら3方策は、それぞれ独立に対策を実施するものであり、例えば、火災の影響軽減の系統分離対策により、単一火災を想定しても異なる区分の火災防護対象機器に影響を与えない場合であっても、他の「火災の発生防止」、「火災の感知及び消火」の対策を実施しなくても良いことにはならない。

まずは、実用上可能な限り不燃、難燃性材料を使用するなどの「火災の発生防止」対策により、火災の発生をできる限り低減し、それでも火災が発生することを想定して、「火災の感知及び消火」対策により、早期感知・消火を達成することで火災の延焼・拡大防止を行う。

さらに、高温停止、低温停止のための安全上重要な機器については、単一火災を想定し、異なる区分に火災の影響がないように「系統分離対策」を実施するものである。最後に、火災影響評価を実施し、これら3方策を施すことによっても、火災が発生した場合を想定して、高温停止、低温停止が達成できる設計であることを確認するものであり、評価によってNGの場合には、3方策にフィードバックされる。

2. 新規制基準を踏まえた火災防護対策について

今回の新規制基準は、従前と大きく変わっている。細かいところは沢山あるが、特に大きく変わった以下の4項目の要求事項について浜岡原子力発電所での対応を紹介する。

(1) 火災を早期に感知できるように固有の信号を發する異

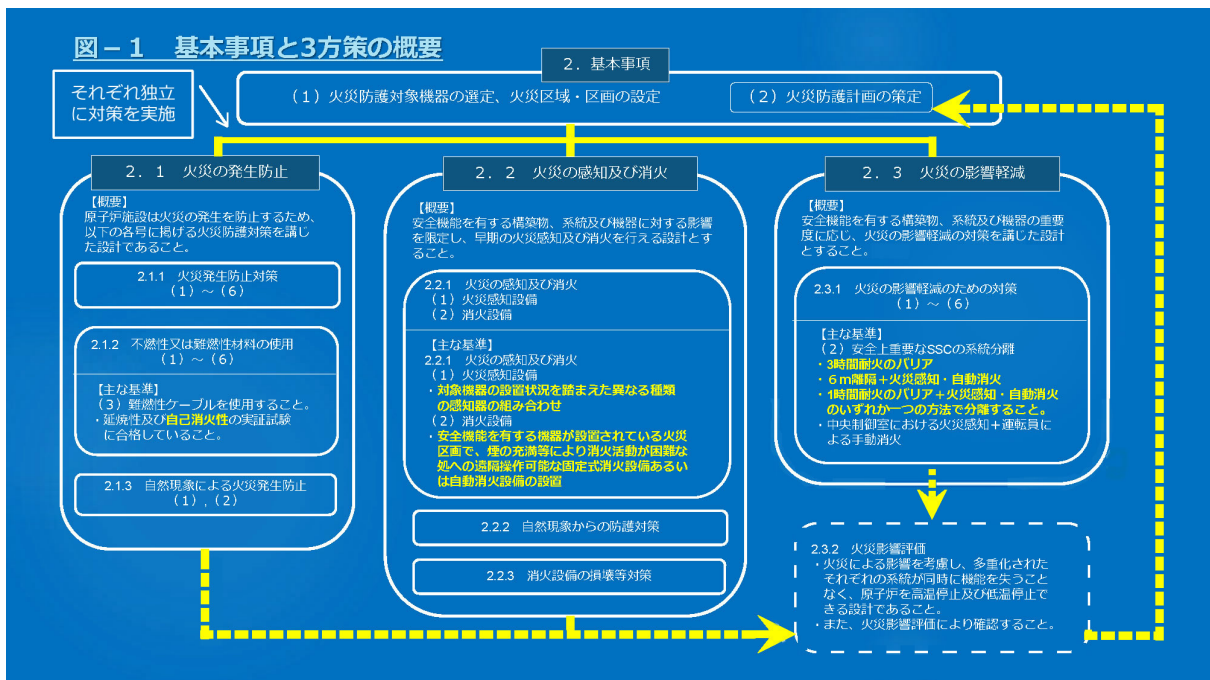


図1 基本事項と3方策の概要

なる種類の感知器又は同等の機能を有する機器を組み合わせることで設置すること。

- (2) 難燃性ケーブルの条件として、自己消火性の実証試験である「UL 垂直燃焼試験」を実施すること。
- (3) 火災時に煙の充満、放射線の影響等により消火活動が困難なところには、自動消火設備又は手動操作による固定式消火装置を設置すること。
- (4) 原子炉施設のいかなる火災に対しても、原子炉の高温停止及び低温停止を達成するための安全機能を確保するために系統分離を行うこと。

2.1 消防法、建築基準法と新規制基準との関係

従前の原子力発電所の火災防護は、感知器や消火設備の設置については、消防法に準じて実施し、耐火壁については、建築基準法の仕様規定に基づき対応していた。これらの適合性は、消防検査や建築確認申請の中で確認され、それをもって、省令 62 号第 4 条の 2 の要求を満足しているものとされていた。消防法、建築基準法の目的は、人命・財産保護であることは言うまでもない。

一方、火災防護に関する新規制基準では、感知器や消火設備の設置に関する考え方が規定されるなど、消防法とは異なる要求事項が追加されている。新規制基準の目的は、従前と同じ「原子炉施設のいかなる火災によっても、安全保護系及び原子炉停止系の作動が要求される場合には、火災による影響を考慮しても、その多重化された系統が同時に機能を失うことなく、原子炉を高温停止及び低温停止できる設計であること。」である。従前においても新規制基準においても、目的は同じであるが、新規制基準と消防法、建築基準法等の他法令は独立して満足する必要がある。

例えば、消防法との関連で言えば、新規制基準では、「火災を早期に感知できるように固有の信号を発する異なる種類の感知器又は同等の機能を有する機器を組み合わせることで設置すること」との要求により、新たに感知器を追加設置することになるが、既設の消防設備に悪影響を与えるのではなく現行の消防法を満足している。(浜岡 4 号機の場合は、消防法で設置した監視設備とは別に、独立して新規制基準要求の感知器・分散処理盤・防災複合盤を新たに設置する計画である。)

建築基準法の関連で言えば、防火区画の設定が前提であり、これに影響を及ぼさないように新規制基準対応を実施することから現行の建築基準法を満足している。

2.2 新規制基準の要求レベルと浜岡原子力発電所の対策

新規制基準の火災防護の審査基準は、おおよそ 30 年

前の米国の決定論的の火災防護規制（連邦規制 10CFR Part50.48 Fire protection (a),(b) , 10CFR Part50 Appendix R, Regulatory Guide 1.189 Fire protection for Nuclear Power Plants) のみを取り込む形で策定された。米国では既に 2004 年にパフォーマンスベース（性能規定）NFPA 805 の取入れが、10CFR Part50.48 Fire protection (c) として追加されている。

原子力規制委員会の新規制基準に関する検討チームの会合では、有識者から「米国の火災防護を参考にしたとして、どういった考え方でやるのか。単純なものまねではいけない。」との意見があったが、結果的にその殆どが取り込まれる形で、災防護に係る審査基準は制定された。

例えば、系統分離は、a,b,c の 3 つの手段から選択する (3.6 (4) で説明) というのが一つの例であり、米国の決定論的の火災防護規制と同じである。

また「火災を早期に感知できるように固有の信号を発する異なる種類の感知器又は同等の機能を有する機器を組み合わせることで設置すること。」とあるが、どのような火災の場合にどのような感知器を設置するかの具体的な仕様の記載はない。さらに結果的に、「火災時に煙の充満、放射線の影響等により消火活動が困難なところには、自動消火設備又は手動操作による固定式消火装置を設置すること。」とあるが、具体的な仕様の記載はない。結果的に「異なる感知器を設置すること」に対しては、事業者が、火災を想定する可燃物の火災態様を考慮して「異なる感知器の設置により早期感知を達成できることの妥当性」を説明することになり、各事業者によって個別の対策内容は異なっている。消火装置の設置要求に対する、消火装置も事業者によって個別の対策は異なっている。

3. 浜岡原子力発電所の対策について

火災の感知、あるいは消火を適切に実施するためには、原子力発電所内にある可燃物を把握し、可燃物の燃焼態様、さらには火災態様（火災の進展過程など）を理解することが重要である。

3.1 燃焼態様

燃焼は、「拡散火災」、「燻焼」、「自然燃焼」、「予混合火災」に分類できるといわれている。「拡散火災」は、建物火災、森林火災、火のついたマッチであり、「燻焼」は、燃え始めか、拡散火災の終わった後に起こる。分かりやすいのは、マッチを吹き消した後の赤熱部分をイメージすれば分かりやすい。「自然燃焼」は、燻焼または火炎に至る化学反応の前段階であり、可燃性液体が沁みだした布や木材チップの山などで生じることがある。「予混合火災」は、内燃機関などの制御され

た燃焼のことをいうが、拡散火災の発生前に、燃料（固体及び液体）を着火するときの火災の始まりでもある。

3.2 火災態様（火災の進展過程）

原子力発電所内では、①ケーブル火災（外的要因：炙り火による火災、内的要因：過電流火災）、②油（機械油：潤滑油）を内包する機器の火災、③電気盤の火災を想定している。

それぞれ想定される火災について、どのような燃焼態様、火災態様であるか、これを考えてみる。

①ケーブル火災（外的要因：炙り火による火災、内的要因：過電流燃焼火災）

● 外的要因：炙り火による火災

ケーブルトレイ近傍にある可燃物が燃焼し火災がケーブルに到達することなどからケーブルが燃焼することを想定している。火元となる可燃物は、油を内包する機器であったり、電気盤であったりするので、②③で言及する。

● 内的要因：過電流火災

過電流火災は、ケーブル許容電流よりも大きな電流が流れ続けることによって発生する。過電流が大きいと火災の発生時間までの時間が短くなり、過電流が小さいと火災発生までの時間は長くなる。ケーブルの過電流火災発生のメカニズムは、電力中央研究所（横須賀地区）における難燃性ケーブル（高圧、低圧）の過電流燃焼・泡消火試験の結果から次のように考えられる。

<過電流火災の進展過程>

まず、過電流によりケーブル導体が加熱することで温度が上昇 → ケーブル内部の絶縁材などが加熱により熱分解し可燃性ガスを発生 → ケーブルの外被（シース：難燃性材料ではあるが）が、過電流による導体温度上昇（約 800 度程度）により、シース自体が熱により損傷 → ケーブル内部に溜まった可燃性ガスが外部に大量に放出 → ガス濃度が燃焼下限界に達しているため周りの熱で引火 → 火災が発生（火災の高さは可燃性ガスの放出高さに相当） → 火災発生後、電流を遮断するも導体温度が下がらないため可燃性ガスが継続的に発生し火災が継続・・・このような進展過程をたどる。

②油（機械油：潤滑油）を内包する機器の火災

液体燃料は、口火付近で燃焼限界下限の濃度を形成するのに十分な速度で蒸発し、蒸発速度は液体温度に支配され着火する。表面濃度が燃焼下限界に達していれば、この濃度で、対応する表面温度は引火点と呼ばれ、口火が液体

表面上の気体中に火災伝播を起こす。引火点が、通常の大気温度（20℃）よりも低いエタノール、メタノール、アセトン、プロパンなどは容易に着火する。灯油などの引火点の高い液体燃料は、加熱を必要とする。

一方、機械油である動的機器に内包されている油は潤滑油であり、液体燃料と比べて引火点が高いため、口火（着火源）があってもすぐには着火しない。火皿の燃焼実験では（火皿の面積の大きさにもよるが）、潤滑油を 250 度程度まで加熱し油面に口火を近づけると着火し、自己燃焼モードで燃焼が継続するが、これは油全体が 250 度に熱せられているため蒸発が十分できる状態になっているからである。逆に言えば、油の温度が高温でない場合は、口火があっても中々着火しないし、自己燃焼モードにはならない。自己燃焼モードになるためには、液体の蒸発が必要であり、蒸発は液体温度に支配されることから、油面付近で着火した場合であっても油が接触する面の温度差によって、液体が蒸発するエネルギーが奪われ、結果的に燃焼が継続しない。機械油の場合、引火点が高いので、これは顕著である。

したがって、動的機器に内包される潤滑油（機械油）の火災の想定は、加熱部分（軸受の過度な摩擦による加熱などが考えられる）に潤滑油が触れることで、局所的に油が加熱され蒸発し火災が発生することが想定される。潤滑油火災では、煙と炎が発生する。（煙は、理論燃焼でない限り発生する。）

③電気盤の火災

電気盤の部品は、様々である。ケーブル、計器、端子台などが金属筐体の中に収められている。また、電気盤内の部品は、発生防止の観点から実用上可能な限り不燃、難燃性材料を使用しており、電気盤を構成する部品は、一般産業品と比べると延焼性は低いと言える。

高分子系の材料で作られている計器や端子台などは、分解温度に達すると固体が液化し可燃性ガスを放出する。電気盤の場合、盤内で着火すると自由空間に比べ閉鎖的な空間であるため、電気盤内の温度は上昇する。この温度上昇が、燃焼物にフィードバックされ、燃焼継続するために必要なエネルギー以上であれば燃焼は継続する。火災の要因は、電氣的事故による短絡やトラッキングなどの現象により発生するが、これら現象が継続する場合には、火災は延焼拡大すると考えられる。なお、電気盤火災は、筐体で囲まれていることから、燃焼に対して十分な酸素が供給されないため、煙が多く発生する特徴がある。

3.3 (1) 火災を早期に感知できるよう固有の信号を発する異

なる種類の感知器又は同等の機能を有する機器を組み合わせて設置すること。

- 可燃物であるケーブル、潤滑油、電気盤などの火災態様は、煙が発生し、炎が発生する。一般的に早期感知の順番は、煙、炎、熱感知器である。
- 既設では、消防に準拠し感知器（主に煙感知器）を設置している。既に設置している感知器とは別に、新たに、固有の信号を発する異なる種類の感知器として、煙、炎、熱感知器などを2種類設置する。
- 新たに設置する感知器は、個々の空間環境及び可燃物の設置状況及び可燃物の燃焼態様を考慮し、最も適した種類を選択する。
- また、これら感知に係る信号は、新たに中央制御室に設置する専用の監視盤で受信し表示する。

3.4 (2) 難燃性ケーブルの条件として、自己消火性の実証試験である「UL 垂直燃焼試験」を実施すること。

- 新規基準では、「自己消火性の実証試験である「UL 垂直燃焼試験」を実施すること」が要求されているため、当該試験を実施し、これを確認する。

UL 試験の概要は次のとおり。

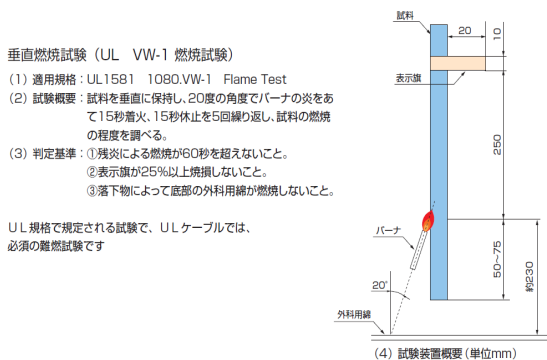


図2 UL 試験の概要

◆従前の難燃性ケーブルの条件

従前では、IEEE383 (1974 版) の垂直トレイ試験のみを実施していた。

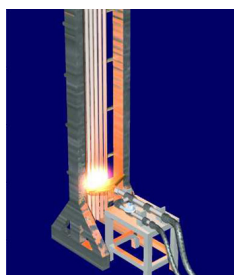


図3 IEEE383の垂直トレイ試験の概要図

この試験は、米国電気学会により開発された試験方法(IEEE383 STD. 1974-2.5)であり、最も世界的に認知された、ケーブル燃焼試験である。日本国内においてもJIS C 3521として規格化されており通信ケーブル、耐火・耐熱電線等の難燃性評価に用いられて

いる。

試験は、規定本数のケーブルをはしご状の垂直に設置されたトレイに規定の方法で(概ねトレイの中央部に試料外径の1/2間隔で150mm以上となるよう取り付け)布設し、トレイ下方より規定のガスバーナーにより20分間ケーブルを燃焼させ、トレイ上方への延焼性を評価する。ガスバーナー位置から180cm上端まで延焼しないこと。バーナー出力は20kWである。

3.5 (3) 火災時に煙の充満、放射線の影響等により消火活動が困難なところには、自動消火設備又は手動操作による固定式消火装置を設置すること。

- 確実に消火を行う為には、可燃物の燃焼態様を把握し、それに適した消火剤を選択することが重要となる。
- 消火装置の設置が必要と考えている主要設備は、①「油を内包する機器」、②「ケーブルトレイ(ケーブル)」、③「電気盤」であり、それに対する消火設備は以下を計画している。

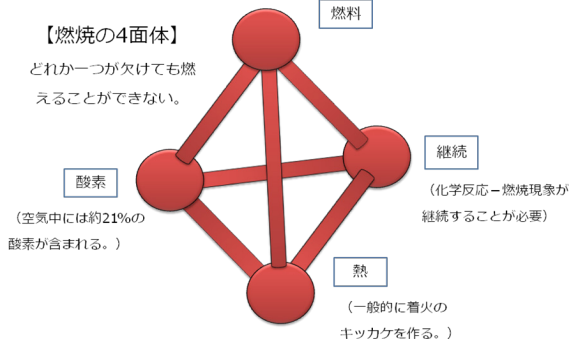
3.5.1 消火設備の考え方と方策

- 火を消すには、4要素のいずれかを取り去れば良い。
- まず、燃料となるものが無ければ、火は消えてしまう。
- 積極的に火を消すためには、燃料となるものの供給を断ち、又は燃料となるものの除去を行う。
- 酸素の供給を絶つには、密閉してその供給を絶つ方法もあるが、一般的には困難である。
- しかし、完全に密閉しなくても、空気中の酸素含有量を16%以下に低下させれば、酸欠空気となって、燃焼現象を止めることができる。そこで、二酸化炭素のようなガスを大量に噴射して、酸欠空気の空間を作り出して消火する方法もある。新しい化学物質(ハロゲン化合物等)の負触媒効果によって消火をする方法もある。
- 但し、炎との化学反応により有毒ガスが発生することに留意すべき。一般に触媒というのは、存在するだけで化学反応を促進させる効果があるが、「負触媒」という物質は、その反対で負触媒が反応の場に存在するだけで、化学反応(燃焼現象)の継続を止めてしまう効果を持つ。このような消火方法が開発されたため、燃焼の要素に「継続」が付加された。
- 水を消火剤として使用するのには、水が燃焼に必要な熱を奪うからである。水1ccにつき1℃上昇するには1cal、蒸発(気化)させるには539calの熱が必要である。

火を消すには、水をかけるのが効果的である。

- 可燃物の状態（液体燃料火災：油火災、個体燃焼火災：ケーブル火災等）による火災態様の違い、消火剤による電気設備への悪影響なども考慮し、**効果的な消火設備を選択**する。

○火の燃える要素 (4要素-燃料・酸素・熱・継続)



○火が消える原理 (4要素-除却・窒息・冷却・中断)

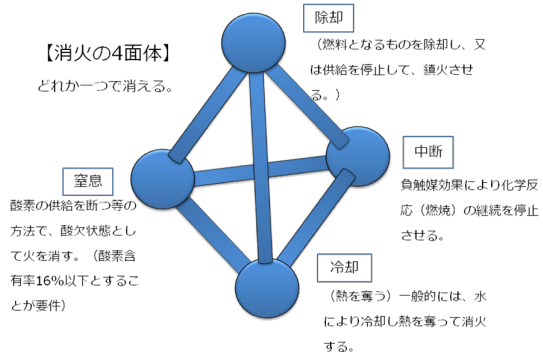


図4 火の燃える要素、火が消える原理

3.5.2 火災区域、火災区画に設置する消火設備

浜岡原子力発電所の火災区域、火災区画に設置を計画している消火設備の一覧を下表に示す。

ここでは、A)～E)の消火設備について具体的に紹介する。なお、F)はE)と同じ盤内ガス自動消火である。また、G)～J)は、消防法の消火設備である。

A) 補機用泡自動消火設備

「油を内包する機器」として、潤滑油を内包する屋内設置の横型・縦型ポンプモータ、屋外設置の縦型ポンプモータが、消火の対象である。

屋内の横型ポンプモータ、比較的小さいポンプモータなど

➡ 油の漏えい拡大防止対策（ドレンリム）を実施することにより、油火災の範囲を限定したうえで、個別機器毎に、ノズルから対象機器に泡消火剤を放出する。

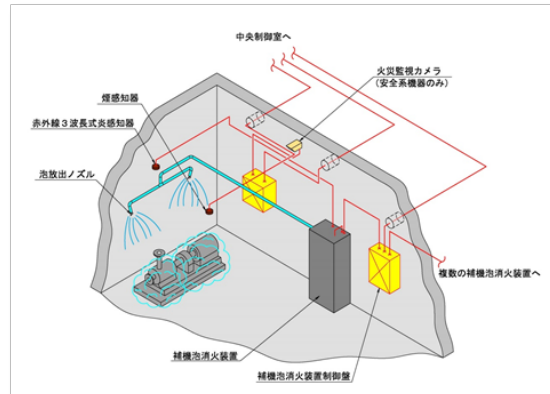


図5 補機用泡自動消火設備の概要図

表1 浜岡原子力発電所における消火設備（案）

消火設備	消火剤	主な消火対象
A) 補機用泡自動消火設備	泡消火剤	・煙充満等による消火活動が困難な火災区域（区画の油内包機器）
B) 補機用 I A 泡自動消火設備	同上	
C) 屋外補機用泡放水銃消火設備	同上	・消火活動が困難な屋外機器、・系統分離対策が必要な屋外の火災区域（区画）
D) ケーブルトレイ用泡自動消火設備	同上	・煙充満等による消火活動が困難な火災区域（区画）、・系統分離対策が必要な火災区域（区画）
E) 電源盤内ガス自動消火設備	HFC-227a（又は同等品）	・火災区域（区画）の電源盤
F) 制御盤内ガス自動消火設備	同上	・系統分離対策が必要な火災区域（区画）
G) 二酸化炭素消火設備	CO ₂	・ディーゼル発電機の関連設備、ケーブル処理室
H) 消火器	粉末、CO ₂ 、ハロゲン化物	・全火災区域（区画）
I) 移動式消火設備（化学消防自動車、小型動力ポンプ付水槽車）	水、泡	・屋外が中心
J) 水消火設備（消火栓）	水	・全火災区域（区画）

D) ケーブルトレイ泡自動消火設備

- 審査基準以前の火災防護対策においても、動力ケーブルに対しては、過電流火災と他の火源による火災想定をしている。
- ケーブルの過電流火災は、ケーブル導体が過電流により加熱し、ケーブル内部の絶縁物などが熱分解し、可燃性ガスが発生し火災に至る。
- ケーブルが全長に亘り燃焼する可能性があるため、ケーブルトレイ内に泡消火剤を放出し消火する。
- ここで用いる泡は、消防法の泡よりも高い濃度の泡を使用している。
- 放出ノズルの開発により、指向性が高く細かな泡を放出することが可能となり、ケーブルトレイ内に泡を放出することができ、泡の冷却効果、窒息効果を高めている。
- これにより、ケーブル導体の温度を下げ再着火を防止し、煙の閉じ込めにも効果がある。

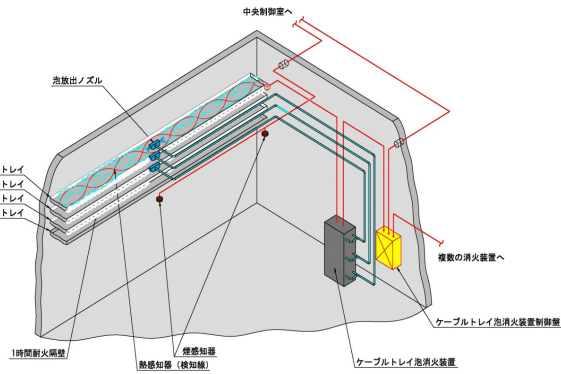


図 12 ケーブルトレイ泡自動消火設備 概要図

◆系統図を以下に示す。

火災の感知は、検知線（熱感知）と煙感知器により行う。過電流試験により、炎が発生する前に検知線が動作することを実証試験で確認済である。また、大量のガス（煙）が発生するため、煙感知器によっても確実に感知が可能である。

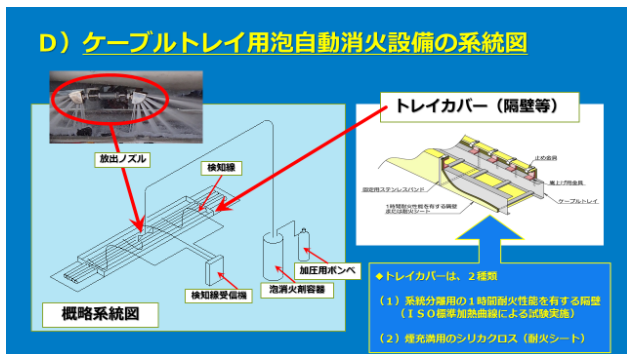


図 13 ケーブルトレイ用泡自動消火設備の系統図

◆電力中央研究所（横須賀地区）における過電流燃焼・消火試験について

これは、試験装置の写真である。当社は、高圧及び低圧の動力ケーブル（いずれも発電所で使用している難燃性ケーブル）を用いて、過電流燃焼試験及び消火試験を実施している。過電流火災は、大量の可燃性ガスが発生し、ガスのケーブル外への放出と加熱源により着火する。実規模の過電流火災に対する泡の消火性能を確認している。

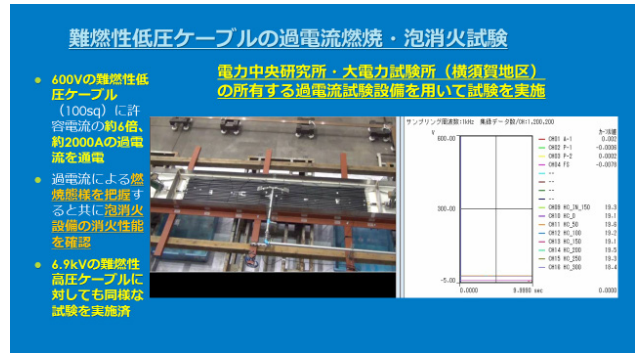


図 14 電中研における試験装置 他

E) 電源盤内 ガス自動消火設備

- 電気盤（M/C、P/C、C/C）は列盤で設置されている場合が多いが、筐体により一つの独立した空間を有している（一部制御ケーブルのダクト貫通部や換気口などの開口部はあるが全体的にしめる面積は小さい）。
- このため、容積に対して十分なガス量を放出することで、負触媒効果による消火が可能である。ガスは電気的に絶縁であり電気事故の心配はない。
- なお、電気盤は密閉構造に近いので、消火効果を高めるため盤内に放出ノズルを設置し、盤内にガスを放出する。
- 火災の感知は、盤内に煙感知（高感度、低感度）を設置する。

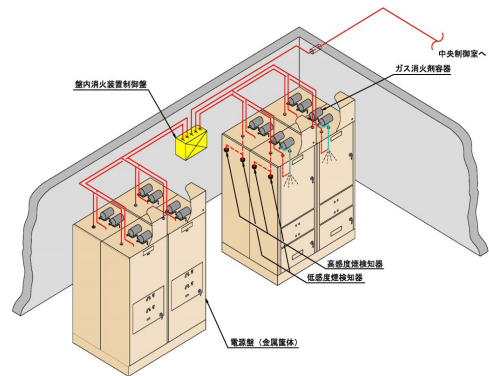


図 15 電気盤 ガス自動消火設備 概要図

3.6 (4) 原子炉施設のいかなる火災に対しても、原子炉の高温停止及び低温停止を達成するための安全機能を確保するために系統分離を行う。系統分離の手法として以下の方策を行うこと。

<新規制基準の内容>

まず、火災区域①を設定し、次に、火災区域の中を細分化する場合は火災区画②を設定する。

- ①の火災区域は、3時間以上の耐火性能を有する耐火壁で囲って分離
- ②の火災区画は、a, b, c^(※)の3つの方法から1つを選択して分離

※：a,b,cのいずれかの手法で系統分離

a：3時間以上の耐火能力を有する隔壁等で分離

b：水平距離が6m以上で分離+火災感知設備・自動消火設備（6mの間には可燃物が存在しないこと）

c：1時間以上の耐火能力を有する隔壁等で分離+火災感知設備・自動消火設備

当社は、cの方法を選択している。

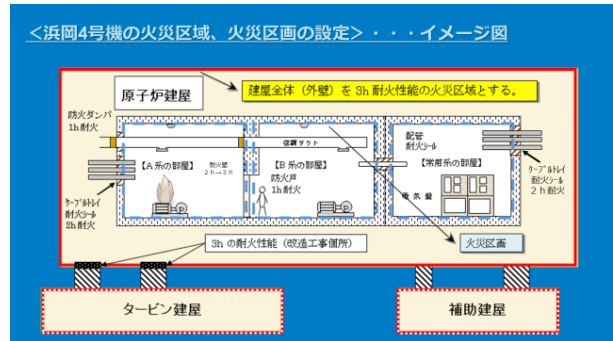


図 16 火災区域、火災区画のイメージ

(平成 27 年 6 月 5 日)

著者紹介

著者：奈良間 雄

所属・役職：

中部電力株式会社 原子力本部 原子力部 運営G 専門部長

専門分野：電気工学、火災防護



EJAM 学術論文投稿募集

EJAM Academic Articles では随時投稿論文を募集しています。EJAM は、2009 年5 月25 日に創刊された英文オンラインジャーナルです。

保全科学、保全工学等とくに原子力発電所等大型施設の保全を対象としています。論文の種類は、Regular Paper、Technical Note、Review Paper です。

タイムリーな発行が可能なオンラインジャーナルという特性を生かすため、充実した、そして迅速な査読プロセスを心がけています。

『保全学』誌に掲載された和文論文の英文投稿も受け付けておりますので、ぜひご検討ください。

EJAM 論文委員会 委員長 小島 史男