

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

補足説明

柏崎刈羽原子力発電所 第7号機
D/Gに関する高エネルギーアーク損傷対策に係る
設計及び工事計画認可申請の概要について

2021年 2月

東京電力ホールディングス株式会社

高エネルギーアーク損傷（HEAF）対策に係る電気盤の設計について

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
3. 技術基準規則への適合が必要な電気盤	3
4. アーク放電を発生させる試験	6
4.1 電気盤の選定	6
4.1.1 同等性に影響を与えるおそれのあるパラメータについて	11
4.1.2 まとめ	18
4.2 短絡電流の目標値	33
4.3 HEAF 試験に用いる電気回路	35
4.4 測定項目	37
4.5 アーク放電の発生方法	43
4.6 アーク放電の継続時間	46
4.7 HEAF 試験の実施	49
4.8 アークエネルギーの計算	52
5. アーク火災発生の評価	53
5.1 アーク火災発生の評価の概要	53
5.2 評価に用いる必要なデータ	53
5.3 アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値に係る評価	54
5.4 しきい値に係る解析による評価	58
6. HEAF に係る対策の判断基準	59

添付資料 1：同等性に影響を与えるおそれのあるパラメータの整理に関する補足について

添付資料 2：火災感知設備及び消火設備の配置について

添付資料 3：D/G 保護ロジックへのインターロック追加に関わる既存設備への影響について

1. 概要

重要安全施設（「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則の解釈」第2条第2項第9号に規定する重要安全施設をいう。以下同じ。）への電力供給に係る電気盤及び当該電気盤に影響を与えるおそれのある電気盤（安全施設（重要安全施設を除く。）への電力供給に係るものに限る。）について，技術基準規則に基づき，遮断器の遮断時間の適切な設定及び非常用ディーゼル発電機（以下「D/G」という。）の停止等により，高エネルギーのアーカ放電によるこれらの電気盤の損壊の拡大を防止することができる設計としている。

本資料では，重要安全施設への電力供給に係る電気盤及び当該電気盤に影響を与えるおそれのある電気盤を整理し，試験体電気盤に対する電気盤設計の妥当性及び遮断時間の適切な設計により，高エネルギーのアーカ放電によるこれらの電気盤の損壊の拡大を防止することができることを補足説明するものである。

なお，今回の申請対象はD/Gに接続する電気盤に対するHEAF対策であるが，本資料では前回のHEAF対策（外部電源の給電時における非常用所内電源系統の電気盤に対するHEAF対策）に今回のHEAF対策の内容を追記することで，HEAF対策の全貌が把握できるように資料を構成している。

2. 基本方針

重要安全施設への電力供給に係る電気盤及び当該電気盤に影響を与えるおそれのある電気盤について、アーク火災による電気盤の損壊の拡大を防止することができるよう、高エネルギーアーク損傷（HEAF）に係る電気盤の設計に関する審査ガイド（以下「審査ガイド」という。）に基づき、上流の遮断器によりアーク放電を遮断することとし、遮断器の遮断時間を適切に設定する。

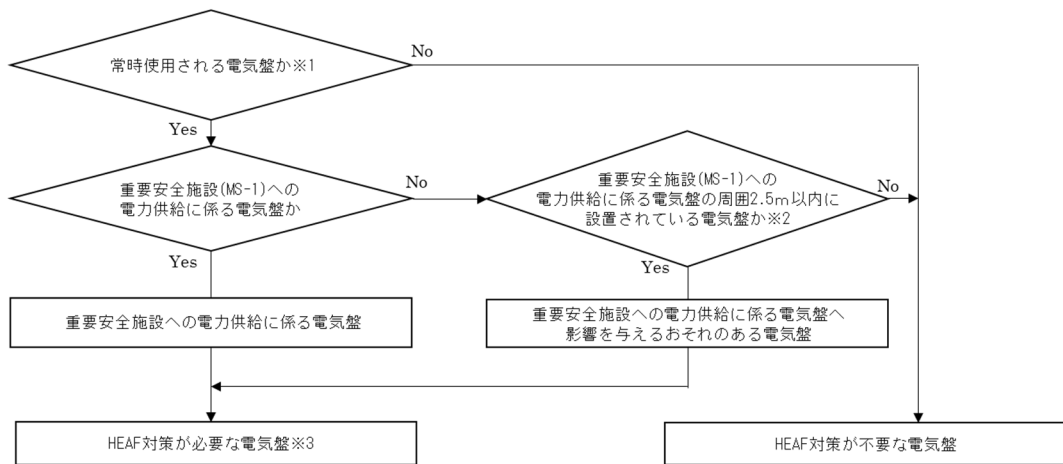
設定した遮断時間と短絡電流等により求められるアークエネルギーが、試験により求められたしきい値を超えないことを評価することにより、HEAF 対策が適切に実施されていることを説明する。

3. 技術基準規則への適合が必要な電気盤

HEAF 対策が必要な電気盤は、技術基準規則第 45 条の解釈第 4 項にて「重要安全施設への電力供給に係る電気盤及び当該電気盤に影響を与えるおそれのある電気盤」と定められている。

重要安全施設は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第 12 条第 6 項に記載され、解釈第 11 項において重要度分類 MS-1 に分類される構築物等が対象と定義されている。

上記を基に、以下のフローにて HEAF 対策が必要な電気盤を整理した。



※1 電線路、主発電機又は非常用電源設備から電気が供給されている電気盤を言う。

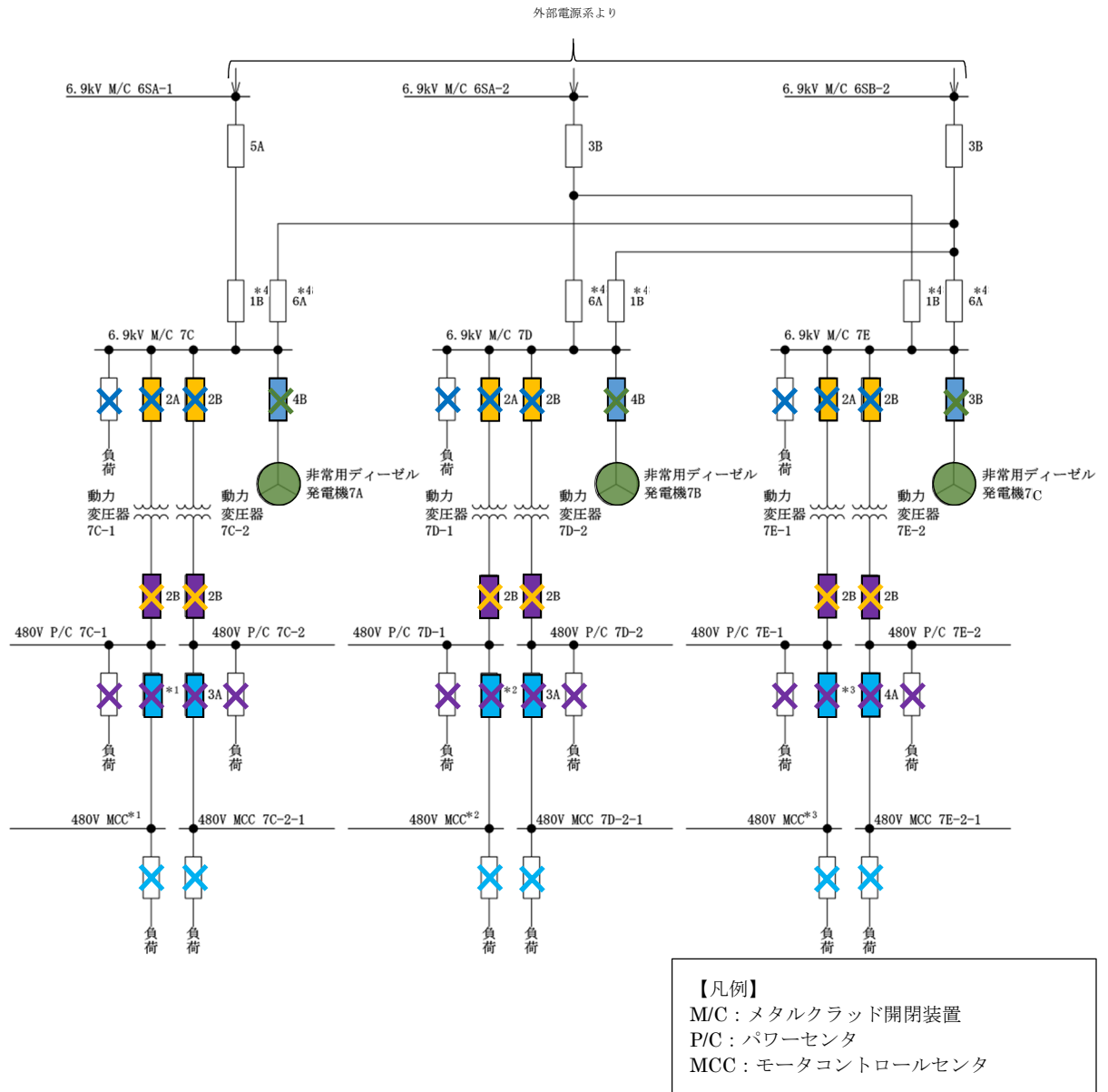
※2 審査ガイドによる。

※3 短絡等が発生した場合、非常に短時間（0.1秒以下）で電気盤への電力供給を止めることができる場合、適切に遮断されていると判断し、HEAF対策が出来ているものとする。

図 3-1 HEAF 対策が必要な電気盤フロー図

表 3-1 HEAF 対策が必要な電気盤の抽出結果
(D/G からの給電時)

アーク放電箇所		アーク放電を遮断するための措置
機器 名称	遮断器名称	
M/C (D/G)	M/C7C-4B (D/G7A 受電遮断器)	D/G7A 停止
	M/C7C 母線に接続される遮断器 (M/C7C-4B を除く)	M/C7C-4B 開放
	M/C7D-4B (D/G7B 受電遮断器)	D/G7B 停止
	M/C7D 母線に接続される遮断器 (M/C7D-4B を除く)	M/C7D-4B 開放
	M/C7E-3B (D/G7C 受電遮断器)	D/G7C 停止
	M/C7E 母線に接続される遮断器 (M/C7E-3B を除く)	M/C7E-3B 開放



注1：「×」はアーク放電発生箇所を示し、塗りつぶした非常用ディーゼル発電機及び遮断器は同色のアーク放電を遮断するために停止または遮断する設備を示す。

注2：非常用ディーゼル発電機に接続される電気盤以外の電気盤におけるアーク放電の遮断時間については、令和2年10月14日付け原規規発第2010147号にて認可された設計及び工事の計画による。

注記*1：3A…480V MCC 7C-1-1, 4A…480V MCC 7C-1-2, 3B…480V MCC 7C-1-3, 4B…480V MCC 7C-1-4, 5A…480V MCC 7C-1-6, 5B…480V MCC 7C-1-7

*2：3A…480V MCC 7D-1-1, 4A…480V MCC 7D-1-2, 3B…480V MCC 7D-1-3, 4B…480V MCC 7D-1-4, 5A…480V MCC 7D-1-6, 5B…480V MCC 7D-1-7

*3：3A…480V MCC 7E-1-1A及び1B, 3B…480V MCC 7E-1-2, 3C…480V MCC 7E-1-3

*4：非常用ディーゼル発電機からの給電時には、当該遮断器は開放状態であるため、評価対象外。

図 3-2 HEAF 対策が必要な電気盤系統図
(D/G からの給電時)

4. アーク放電を発生させる試験

メタルクラッド開閉装置（以下「M/C」という。）、パワーセンタ（以下「P/C」という。）、モータコントロールセンタ（以下「MCC」という。）及びメタルクラッドスイッチギアのうちD/Gに接続される電気盤（以下「M/C(D/G)」という。）において、アーク放電が発生した際にアーク火災が発生するアークエネルギーのしきい値を求めることを目的とし、アーク放電を発生させる試験（以下「HEAF試験」という。）を実施した。

4.1 電気盤の選定

（審査ガイド抜粋【2.1 電気盤の選定】）

実用発電用原子炉施設内の電気は、原子炉運転中においては主発電機からの電力の一部が変圧器によって降圧された後、高圧電源盤及び低圧電源盤を介してモータ等に供給されている。HEAF試験に用いられる電気盤は、実際に所内で使用されているものと同等の高圧電源盤及び低圧電源盤が選定されていることを確認する。

アーク火災は、添付資料1に示すメカニズムにより発生することから、アーク火災発生の有無は、①非密閉性の程度、②高温ガスの滞留場所、③可燃物及び④アークエネルギーによるものと考えられる。試験に用いられる電気盤については、これら4つのパラメータを踏まえて、実際に所内で使用されているもの（以下「実機」という。）と同等の高圧電気盤及び低圧電気盤を選定した。

なお、M/C(D/G)試験とM/C(D/G)以外の試験で用いられる電気盤（以下、「M/C試験」という。）は、JEM-1425及びJEC-2300に基づき製造された同等の高圧電気盤である。

表 4-1 試験で用いた電気盤のスペック一覧表 (1/4)


種類	電気盤	試験で用いた電気盤のスペック		電気盤の概況
M/C	試験体①	遮断方式	VCB (真空遮断器)	
		系統	定格電圧 : 7.2kV 定格周波数 : 50Hz 定格短時間耐電流 : 40kA/2 秒	
		概略寸法	高さ 2700mm (含上部ダクト 400mm) × 幅 1000mm × 奥行き 2600mm	
	試験体②	遮断方式	VCB (真空遮断器)	
		系統	定格電圧 : 7.2kV 定格周波数 : 50Hz 定格短時間耐電流 : 63kA/2 秒	
		概略寸法	高さ 2600mm (含上部ダクト 300mm) × 幅 1000mm × 奥行き 2500mm	

表 4-1 試験で用いた電気盤のスペック一覧表 (2/4)




種類	電気盤	試験で用いた電気盤のスペック		電気盤の概況
P/C	試験体③	遮断方式	ACB (気中遮断器)	
		系統	定格使用電圧：AC480V 定格周波数：50Hz 定格短時間耐電流：50kA/1 秒	
		概略寸法	高さ 2600mm (含制御ダクト 300mm) × 幅 650mm × 奥行き 1800mm	
P/C	試験体④	遮断方式	ACB (気中遮断器)	
		系統	定格使用電圧：AC480V 定格周波数：50Hz 定格短時間耐電流：50kA/0.5 秒	
		概略寸法	【受電盤】高さ 2300mm × 幅 800mm × 奥行き 2000mm 【フィーダ盤】高さ 2300mm × 幅 600mm × 奥行き 2000mm	
P/C	試験体⑤	遮断方式	ACB (気中遮断器)	
		系統	定格使用電圧：AC420V 定格周波数：50Hz 定格短時間耐電流：40kA/1 秒	
		概略寸法	【受電盤】高さ 2300mm × 幅 800mm × 奥行き 2200mm 【フィーダ盤】高さ 2300mm × 幅 700mm × 奥行き 2200mm	

表 4-1 試験で用いた電気盤のスペック一覧表 (3/4)

種類	電気盤	試験で用いた電気盤のスペック		電気盤の概況
MCC	試験体⑥	遮断方式	MCCB (配線用遮断器)	
		系統	定格使用電圧 : AC460V 定格周波数 : 50Hz 定格遮断電流 : 50kA	
		概略寸法	高さ 2300mm×幅 600mm×奥行き 600mm	

表 4-1 試験で用いた電気盤のスペック一覧表 (4/4)

種類	電気盤	試験で用いた電気盤のスペック		電気盤の概況
M/C (D/G)	試験体⑦	遮断方式	VCB (真空遮断器)	
		系統	定格使用電圧：7.2kV 定格周波数：50Hz 定格短時間耐電流：40kA/1 秒	
		概略寸法	高さ 2300mm×幅 1000mm×奥行き 2500mm (天井に換気口あり)	

4.1.1 同等性に影響を与えるおそれのあるパラメータについて

①非密閉性の程度，②高温ガスの滞留場所，③可燃物及び④アークエネルギーの4つのパラメータについて，電気盤選定の同等性に影響を与えるおそれのあるパラメータを整理すると以下のとおりである。よって，②高温ガスの滞留場所及び③可燃物に対する電気盤選定の同等性について検証する。

なお，同等性の検証にあたっては，柏崎刈羽原子力発電所第7号機に設置されているメーカ製の電気盤のうち，「5.3 アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値に係る評価」にて設定したしきい値以上のアークエネルギーで，アーク火災が発生しなかった試験体(M/C:試験体②，P/C:試験体⑤及びMCC:試験体⑥)を代表として比較・評価を行う。

表 4-2 同等性に影響を与えるおそれのあるパラメータの整理

主要パラメータ	影響の有無	電気盤選定の同等性に関する考察
① 非密閉性の程度	無	<p>HEAF 試験の結果や，添付資料 1 のとおり，電気盤は密閉構造ではなく開口部を有する構造であることから，電気盤選定の同等性に影響を与えるおそれはない。</p> <p>なお，M/C (D/G) 試験に用いる電気盤は，先行 M/C 試験で用いた電気盤と同様の構造であることから密閉構造ではなく開口部を有する。したがって，M/C (D/G) 試験と先行 M/C 試験では，ピーク圧力には違いはあるものの同様の波形形状を示しており開口部から高温ガスが電気盤外に抜けている。このことより先行 M/C 試験と同様であり電気盤選定の同等性に影響を与えるおそれはない。</p> <p>試験結果を比較するとピーク圧力に差がみられることについては，M/C (D/G) 試験の方が電流値の試験条件が小さくアークパワーに差があるためである。詳細は，添付資料 1 参照。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ M/C (D/G) 試験：ピーク圧力 2.98kPa ・ 先行 M/C 試験：ピーク圧力 62.5kPa <p>更に，規格類 (JEM-1425 等) に基づき，遮断器，母線及びケーブルをそれぞれ区分したコンパートメントに収納する構造となっている。また，JEM-1425 には換気に対する規定もありコンパートメント構造というものの開口部があってもいいとされていることから，換気のための開口や隙間は存在する。</p>

主要パラメータ	影響の有無	電気盤選定の同等性に関する考察
② 高温ガスの滞留場所	有	<p>HEAF 試験の結果や、添付資料 1 のとおり、盤の構造等により電気盤選定の同等性に影響を与える恐れがある。</p> <p>また、アーク放電の発生方法については、審査ガイド 2.5 章に沿って、遮断器の受電側及び配電側で銅線をワイヤリングすることによって HEAF 試験を実施している。</p> <p>なお、M/C (D/G) 試験に用いた電気盤は、先行 M/C 試験で用いた電気盤と同様の構造である。</p>
③ 可燃物	有	<p>HEAF 試験の結果や、添付資料 1 のとおり、高温ガスの滞留場所の可燃物が主要な燃焼物となっていることから、可燃物の種類の差異により電気盤選定の同等性に影響を与えるおそれがある。</p> <p>なお、M/C (D/G) 試験に用いた電気盤は、先行 M/C 試験で用いた電気盤と同様の構造である。</p>
④アークエネルギー	無	<p>アークエネルギーについては、審査ガイド 2.6 章に沿って、アーク放電の継続時間を段階的に変化させて HEAF 試験を実施しているものである。このパラメータは、同等性を有する電気盤に対する試験条件であることから、電気盤選定の同等性に影響をあたえるおそれはない。</p>

②高温ガスの滞留場所に対する同等性

高温ガスの滞留場所は、電気盤の構造及び盤サイズに左右される。盤サイズについては、定格電圧が決まれば、概略の盤サイズが決定されることを踏まえ、実機と同等の盤構造及び定格電圧の電気盤を試験体として選定した。

a. M/C

実機の盤については、JEM-1425（日本電機工業会規格 金属閉鎖形スイッチギヤ及びコントロールギヤ）に基づき製造されており、盤構造は「分類」のうちメタルクラッド形スイッチギヤ（遮断器、母線及びケーブルをそれぞれ区分したコンパートメントに収納する構造）を採用している。また、定格電圧は、「定格」のうち7.2kVを採用している。更に、「設計及び構造」の要求事項を満足するような構造となるように設計している。（表 4-3 参照）

また、実機の遮断器については、JEC-2300（電気学会 電気規格調査会標準規格 交流遮断器）に基づき製造されており、定格電圧は「定格」のうち7.2kVを採用し、「一般構造」の要求事項を満足する設計としている。（表 4-4 参照）

このため、試験体についても JEM-1425 及び JEC-2300 に基づき製造され、盤構造がメタルクラッド型スイッチギヤとなっており、定格電圧が7.2kVの電気盤を採用した。

表 4-12 に示すとおり、実機及び試験体の盤構造は、遮断器、母線及びケーブルをそれぞれ区分したコンパートメントに収納する構造となっており、盤サイズも同等となっている。

なお、M/C(D/G)試験の試験体についても前述と同様に JEM-1425 及び JEC-2300 に基づき、製造されたものであることから同等である。

また、コンパートメントに収納する構造であることから、隣接した盤からのアーク放電の影響を受けにくい構造となっている。

表 4-3 JEM-1425 における実機及び試験体の電気盤との比較・評価

JEM-1425 の主要な項目		比較・評価
4. 分類	<ul style="list-style-type: none"> ・メタルクラッド形スイッチギヤ ・コンパートメント形スイッチギヤ ・キュービクル形スイッチギヤ 	実機及び試験体の電気盤ともに、メタルクラッド形スイッチギヤを使用している
6. 定格	定格電圧 3.6kV, 7.2kV, 12kV, 17.5kV, 24kV, 36kV	実機及び試験体の電気盤ともに、7.2kV の定格電圧である
7. 設計及び構造	スイッチギヤは、通常運転、保守点検作業及び主回路の無電圧確認が安全にできるように設計しなければならない。(以下略)	実機及び試験体の電気盤ともに、本要求に基づき設計されている

表 4-4 JEC-2300 における実機及び試験体の電気盤との比較・評価

JEC-2300 の主要な項目		比較・評価
4. 定格	4.2 定格電圧 3.6kV, 7.2kV, 12kV, 24kV, 36kV, 72kV, 84kV, 120kV・・・	実機及び試験体の電気盤ともに、7.2kV の定格電圧である
5. 動作責務と構造	5.5 一般構造 5.5.1 遮断器の構造は、電氣的及び機械的に十分な耐久性を有し、操作は円滑確実に衝撃が少なく、保守点検は、安全かつ容易にできるよう、製作されなければならない。(以下略)	実機及び試験体の電気盤ともに、本要求に基づき設計された構造となっている

b. P/C

実機の盤については、JEM-1265（日本電機工業会規格 低圧金属閉鎖形スイッチギヤ及びコントロールギヤ）に基づき製造されており、盤構造は、「低圧スイッチギヤの形」のうち、接地された金属閉鎖箱内に装置が一括して収納された構造（以下「金属閉鎖形構造」という。）を採用している。また、定格絶縁電圧は、「定格」のうち 600V を採用している。更に、「閉鎖箱」の要求事項を満足するような構造となるように設計している。（表 4-5 参照）

また、実機の遮断器については、JEC-160（電気学会 電気規格調査会標準規格 気中しゃ断器）に基づき製造されており、定格絶縁電圧は「定格」のうち 600V を採用し、「構造及び性能」の要求事項を満足する設計としている。（表 4-6 参照）

このため、試験体についても、JEM-1265 及び JEC-160 に基づき製造され、盤構造が金属閉鎖形構造となっており、定格絶縁電圧が 600V の電気盤を採用した。

表 4-12 に示すとおり、実機及び試験体の盤構造は、金属閉鎖形構造となっており、盤サイズも同等となっている。

表 4-5 JEM-1265 における実機及び試験体の電気盤との比較・評価

JEM-1265 の主要な項目		比較・評価
5. 定格	定格絶縁電圧 250V, 500V, 600V	実機及び試験体の電気盤ともに、 600V の定格絶縁電圧である
6.9 低圧スイッチギヤの形	接地された金属閉鎖箱内に装置が一括して収納されていなければならない。	実機及び試験体の電気盤ともに、接地された金属閉鎖箱内に装置が一括して収納されている
6.5 閉鎖箱	閉鎖箱は、金属製とする。(略) 低圧スイッチギヤは、通常の使用状態で起こり得る機械的、電氣的及び熱的応力に耐え、同時に温度変化にも耐え得る材料だけで構成しなければならない。(以下略)	実機及び試験体の電気盤ともに、本要求に基づき設計された構造となっている

表 4-6 JEC-160 における実機及び試験体の電気盤との比較・評価

JEC-160 の主要な項目		比較・評価
4. 定格	定格絶縁電圧 600V	実機及び試験体の電気盤ともに、 600V の定格絶縁電圧である
6. 構造及び性能	6.1 構造 6.1.1 構造一般 遮断器は、良質の材料を用いて丈夫に作られ、操作は安全・円滑・確実で、保守点検は安全・容易にでき、取替えを必要とする部品は互換性を有し、できるだけ簡単に取替えられなければならない。(以下略)	実機及び試験体の電気盤ともに、本要求に基づき設計されている

c. MCC

実機については、JEM-1195（日本電機工業会規格 コントロールセンタ）に基づき製造されており、MCC とは、「主回路開閉器・保護装置及び監視・制御器具などを単位回路ごとにまとめた単位装置を、閉鎖した外箱に集合的に組み込んだ装置」と定義されていることから、盤構造は、JEM-1195 に基づき製造された MCC であれば同様である。また、定格絶縁電圧は、「定格」のうち 600V を採用している。更に、「構造」の要求事項を満足するような構造となるように設計している。(表 4-7 参照)

このため、試験体についても、JEM-1195 に基づき製造された MCC であり、定格絶縁電圧が 600V の電気盤を採用した。

表 4-12 に示すとおり、実機及び試験体の盤構造及び盤サイズは、同等となっている。

表 4-7 JEM-1195 における実機及び試験体の電気盤との比較・評価

JEM-1195 の主要な項目		比較・評価
5. 定格	定格絶縁電圧 250V, 600V	実機及び試験体の電気盤ともに、 600V の定格絶縁電圧である
8. 構造	8.1 構造一般 a) 外箱は堅ろうな金属製とし、収納機器の質量、動作による衝撃などに十分耐える構造でなければならない。(以下略)	実機及び試験体の電気盤ともに、本 要求に基づき設計されている

以上のとおり、選定した試験体の高温ガスの滞留場所については、実機に対して同等性を有している。

③可燃物に対する同等性

高温ガスの滞留場所にある可燃物は、主に通電部まわりの絶縁物である。当該箇所に使用される絶縁物の材料の耐熱温度が、実機と同等の電気盤を試験体として選定した。
(表 4-8～表 4-11 参照)

具体的には、M/C については、実機と同じ絶縁物の材料を使用している電気盤を採用し、P/C 及び MCC については、実機と同じ絶縁物の材料及び、保守的に、実機より耐熱温度の低い絶縁物の材料を使用している電気盤を試験体として採用した。

M/C (D/G) 試験の試験体も前述と同様に実機と同じ絶縁物の材料を使用している電気盤を試験体として採用した。

このため、選定した試験体の可燃物は、実機に対して同等性を有している。

表 4-8 M/C における実機及び試験体の絶縁物の材料の比較・評価

M/C の絶縁物の材料		比較・評価
試験体	エポキシ樹脂 (耐熱温度：150～200℃) ・ブッシング	実機及び試験体ともに、絶縁物は、エポキシ樹脂が使用されている
実機	エポキシ樹脂 (耐熱温度：150～200℃) ・モールドフレーム ・ブッシング ・支持サポート	

表 4-9 P/C における実機及び試験体の絶縁物の材料の比較・評価

P/C の絶縁物の材料		比較・評価
試験体	フェノール樹脂 (耐熱温度：150℃) ・支持サポート	試験体の絶縁物は、耐熱温度 150℃の材料であり、実機の絶縁物は、試験体と同等以上の耐熱温度 150℃及び 150～200℃の材料が使用されている
実機	エポキシ樹脂 (耐熱温度：150～200℃) ・支持サポート (表 4-13 実機①) フェノール樹脂 (耐熱温度：150℃) ・支持サポート (表 4-13 実機②, ③)	

表 4-10 MCC における実機及び試験体の絶縁物の材料の比較・評価

MCC の絶縁物の材料		比較・評価
試験体	変性ポリフェニレンエーテル（耐熱温度：90～105℃） ・母線絶縁カバー	試験体の絶縁物は，耐熱温度 90～105℃の材料であり，実機の絶縁物は，試験体と同等以上の耐熱温度 90～105℃及び 120℃～130℃の材料が使用されている
実機	ポリカーボネイト（耐熱温度：120℃～130℃） ・母線絶縁カバー（表 4-13 実機①） 変性ポリフェニレンエーテル（耐熱温度：90～105℃） ・母線絶縁カバー（表 4-13 実機②）	

表 4-11 M/C(D/G)における実機及び試験体の絶縁物の材料の比較・評価

M/C(D/G) の絶縁物の材料		比較・評価
試験体	不飽和ポリエステル樹脂（耐熱温度：130℃～150℃） ・モールドフレーム	試験体の絶縁物は，耐熱温度 130～150℃の材料であり，実機の絶縁物は，試験体と同等以上の耐熱温度 150～200℃の材料が使用されている
実機	エポキシ樹脂（耐熱温度：150℃～200℃） ・モールドフレーム ・ブッシング ・支持サポート	

4.1.2 まとめ

アーク火災発生の有無は，①非密閉性の程度，②高温ガスの滞留場所，③可燃物及び④アークエネルギーによるが，試験に用いられる電気盤については，これら 4つのパラメータの内，②及び③が実際に所内で使用されているものとの同等性に影響を与えるおそれがあることから，②及び③の観点で実機と同等の電気盤を試験体として選定した。

このため，試験に用いられる電気盤と実際に所内で使用されているものとは同等性がある。

表 4-12 HEAF 試験に使用した電気盤及び実機で使用している電気盤構造の分類 (1/8)

種類	電気盤	盤構造
M/C	試験体②	

表 4-12 HEAF 試験に使用した電気盤及び実機で使用している電気盤構造の分類 (2/8)

種類	電気盤	盤構造
M/C	実機①	

表 4-12 HEAF 試験に使用した電気盤及び実機で使用している電気盤構造の分類 (3/8)

種類	電気盤	盤構造
P/C	試験体④	

表 4-12 HEAF 試験に使用した電気盤及び実機で使用している電気盤構造の分類 (4/8)

種類	電気盤	盤構造
P/C	実機①	
P/C	実機②	

表 4-12 HEAF 試験に使用した電気盤及び実機で使用している電気盤構造の分類 (5/8)

種類	電気盤	盤構造
MCC	試験体⑥	

表 4-12 HEAF 試験に使用した電気盤及び実機で使用している電気盤構造の分類 (6/8)

種類	電気盤	盤構造
MCC	実機①	
MCC	実機②	

表 4-12 HEAF 試験に使用した電気盤及び実機で使用している電気盤構造の分類 (7/8)

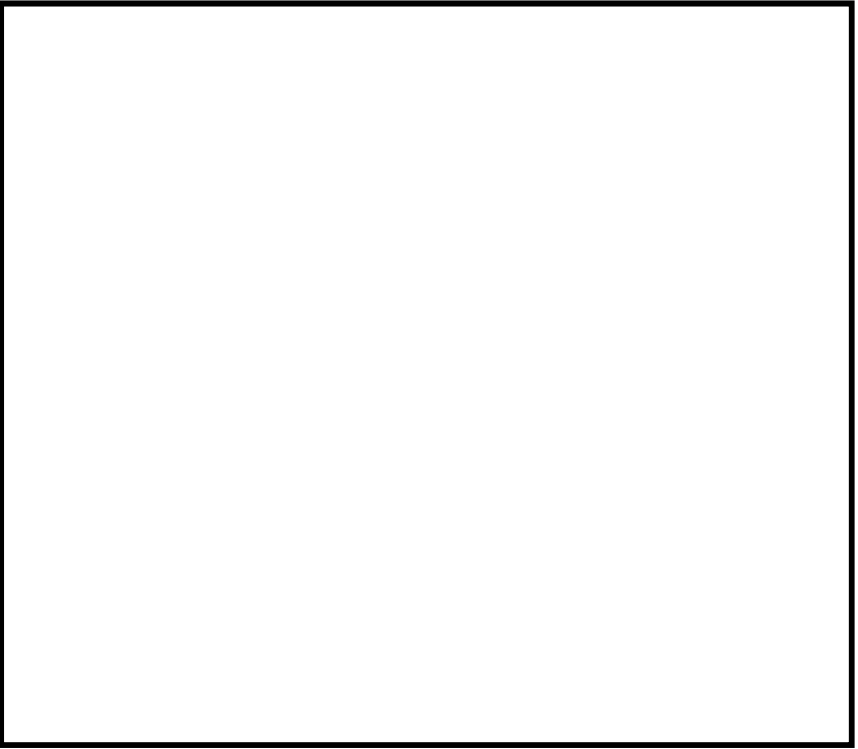
種類	電気盤	盤構造
M/C (D/G)	試験体⑦	

表 4-12 HEAF 試験に使用した電気盤及び実機で使用している電気盤構造の分類 (8/8)

種類	電気盤	盤構造
M/C (D/G)	実機①	

表 4-13 実機及び試験体の可燃物に対する同等性 (1/7)

種類	遮断器	遮断器に使用されている 主な絶縁物	外形図
M/C	試験体②	エポキシ樹脂 (耐熱温度：150～200℃) ・ブッシング	

表 4-13 実機及び試験体の可燃物に対する同等性 (2/7)

種類	遮断器	遮断器に使用されている 主な絶縁物	外形図
M/C	実機①	エポキシ樹脂 (耐熱温度：150～200℃) ・モールドフレーム ・ブッシング ・支持サポート	

表 4-13 実機及び試験体の可燃物に対する同等性 (3/7)

種類	遮断器	遮断器に使用されている 主な絶縁物	外形図
P/C	試験体⑤	フェノール樹脂 (耐熱温度：150℃) ・支持サポート	

表 4-13 実機及び試験体の可燃物に対する同等性 (4/7)

種類	遮断器	遮断器に使用されている 主な絶縁物	外形図
P/C	実機①	エポキシ樹脂 (耐熱温度：150～200℃) ・支持サポート	
P/C	実機②	フェノール樹脂 (耐熱温度：150℃) ・支持サポート	
P/C	実機③	フェノール樹脂 (耐熱温度：150℃) ・支持サポート	

表 4-13 実機及び試験体の可燃物に対する同等性 (5/7)

種類	遮断器	遮断器に使用されている 主な絶縁物	外形図
MCC	試験体⑥	変性ポリフェニレンエーテル (耐熱温度：90～105℃) ・母線絶縁カバー	

表 4-13 実機及び試験体の可燃物に対する同等性 (6/7)

種類	遮断器	遮断器に使用されている 主な絶縁物	外形図
MCC	実機①	ポリカーボネイト (耐熱温度：120～130℃) ・母線絶縁カバー	
MCC	実機②	変性ポリフェニレンエーテル (耐熱温度：90～105℃) ・母線絶縁カバー	

表 4-13 実機及び試験体の可燃物に対する同等性 (7/7)

種類	遮断器	遮断器に使用されている 主な絶縁物	外形図
M/C (D/G)	試験体⑦	不飽和ポリエステル樹脂 (耐熱温度：130～150℃) ・モールドフレーム	
M/C (D/G)	実機①	エポキシ樹脂 (耐熱温度：150℃ ～200℃) ・モールドフレーム ・ブッシング ・支持サポート	

4.2 短絡電流の目標値

(審査ガイド抜粋【2.2 短絡電流の目標値】)

HEAF 試験において電気盤にアーク放電を発生させる電流の目標値として、短絡電流値を設定する必要がある。各電気盤の短絡電流値は、電気系統の設計時に設定されている値を踏まえて、設定されていることを確認する。(解説-2)

なお、HEAF 試験に用いる電気盤の受電側に印加する電圧については、電気盤の実使用条件である定格電圧値を踏まえて、初期の印可電圧を設定していることを確認する。

(解説-2) 一般的な電気盤における短絡電流値の算出方法について

短絡電流値は、評価対象とする電気盤の受電側に接続している変圧器の二次側定格電流と当該変圧器の短絡インピーダンスによって算出される。

まず、変圧器二次側の定格電流 I_0 は、三相短絡容量 W 及び定格電圧 V_0 から次のように求められる。

$$I_0 = W / (\sqrt{3} \times V_0) \quad \text{式(1)}$$

I_0 : 変圧器二次側の定格電流[A], W : 三相短絡容量[VA], V_0 : 定格電圧[V]

また、計算上最大の三相の短絡電流 I_b は、短絡インピーダンス Z 及び定格電流 I_0 から次のように求められる。

$$I_b = I_0 \times 100 / Z \quad \text{式(2)}$$

I_b : 三相の短絡電流[A], I_0 : 定格電流[A], Z : 短絡インピーダンス[%]

ここで、短絡インピーダンスとは、変圧器の二次側を短絡させた状態で一次側に電圧を印加し、二次側の電流が定格電流になった時の一次側の電圧と二次側の定格電圧との比を百分率で表したもので、短絡電流の計算に使用されるものである。

HEAF 試験における短絡電流値の目標値は、実機プラントにて使用している電気盤の三相短絡電流値を踏まえて設定している。

表 4-14 HEAF 試験時における短絡電流の目標値

電気盤	短絡電流目標値	【参考】 柏崎刈羽原子力発電所第 7 号機の短絡電流値
M/C	18.9kA 又は 40.0kA * ¹	37.7kA
P/C	45.0kA	34.2kA 又は 37.0kA * ²
MCC	45.0kA	34.2kA 又は 37.0kA * ²
M/C(D/G)	5kA	2.99kA * ³

注記*1 : 短絡電流の違いによる傾向を確認するため 2 パターン設定して試験を実施した。

*2 : 設備仕様の違いにより短絡電流値が異なる。

*3 : 「第 3 回新規要件に関する事業者意見の聴取に係る会合 (2018 年 10 月 15 日)」での試験条件設定の考え方詳細 (補 6) に示す通り、M/C (D/G) 試験については低電流が長時間流れる領域である初期ピーク後の低電流・長時間電流領域を短絡電流値とする。

また、HEAF 試験における初期の印可電圧は、柏崎刈羽原子力発電所第 7 号機において使用している電気盤の定格使用電圧値を踏まえて設定している。

表 4-15 HEAF 試験時における試験初期の印可電圧

電気盤	試験初期の印可電圧	【参考】 柏崎刈羽原子力発電所第 7 号機の電気盤の定格使用電圧
M/C	6.9kV 又は 8.0kV *	6.9kV
P/C	504V	480V
MCC	504V	480V
M/C(D/G)	6.9kV	6.9kV

注記* : 試験設備の都合により、短絡電流目標値 18.9kA に対しては 6.9kV で実施し、40.0kA に対しては 8.0kV で実施した。

なお、アーク火災発生の有無は、電流及び電圧の積をアーク放電の継続時間で積分して算出するアークエネルギーに依存しており (「5. アーク火災発生の評価」参照)、短絡電流値及び印可電圧の違いは、試験結果に影響を及ぼすものではない。

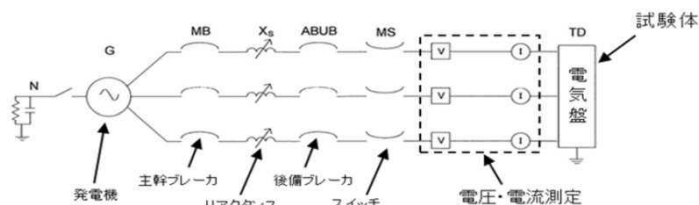
このことから、実機プラント相当の短絡電流値及び定格使用電圧を用いて、アーク放電の継続時間を変えることで、火災が発生するアークエネルギーのしきい値を求める試験を実施した。

4.3 HEAF 試験に用いる電気回路

(審査ガイド抜粋【2.3 HEAF 試験に用いる電気回路】)

HEAF 試験に用いる電気回路は、付録 A に示す電気回路又は同等の電気回路を用いていることを確認する。

付録 A HEAF 試験に用いる電気回路の一例



HEAF 試験に用いる電気回路は、短絡発電機、主遮断器、投入器、限流リアクトル、計器用変圧器及び変流器等で構成されており、審査ガイドに示されているものと同様である。M/C、P/C、MCC 及び M/C(D/G)それぞれについて電気回路を以下に示す。

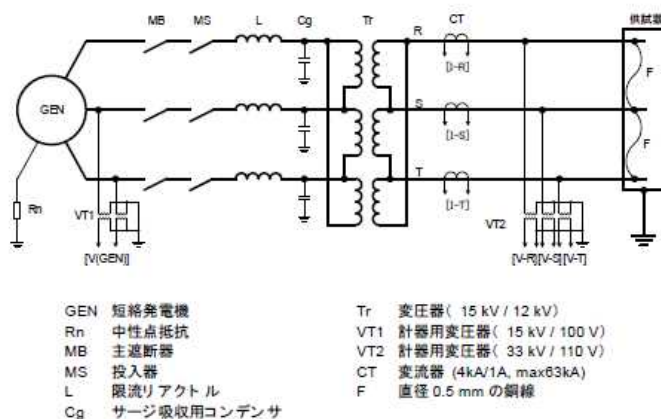


図 4-1 M/C 試験回路

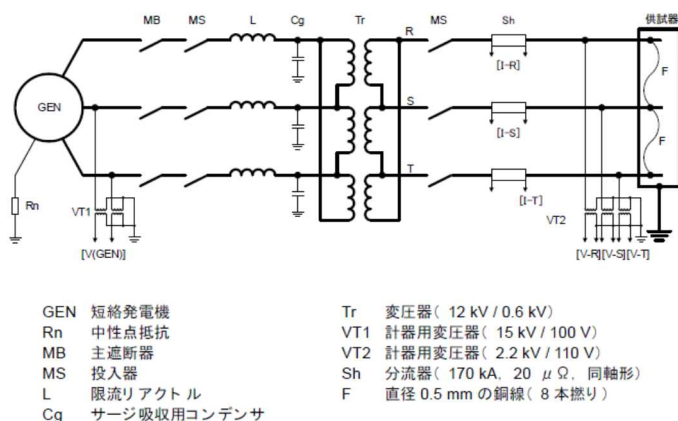
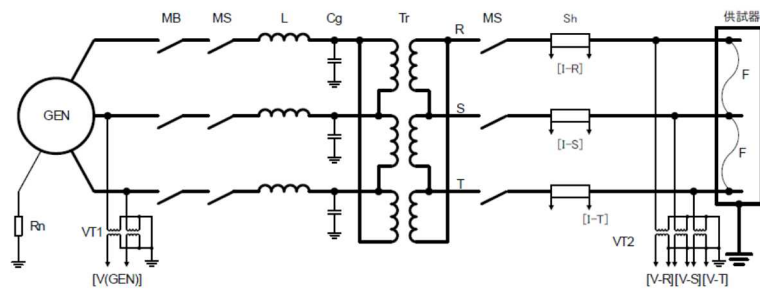
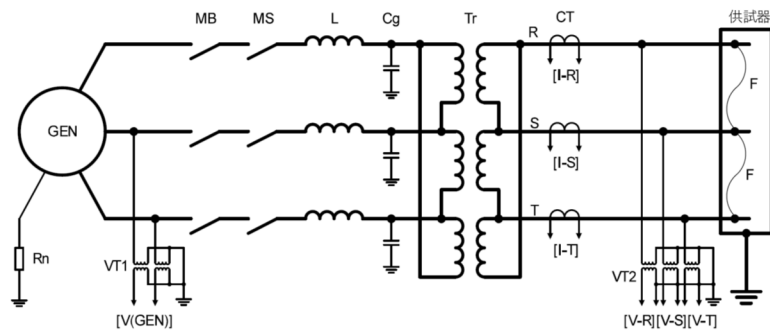


図 4-2 P/C 試験回路



- | | | | |
|-----|-------------|-----|------------------------------------|
| GEN | 短絡発電機 | Tr | 変圧器 (12 kV / 0.6 kV) |
| Rn | 中性点抵抗 | VT1 | 計器用変圧器 (15 kV / 100 V) |
| MB | 主遮断器 | VT2 | 計器用変圧器 (2.2 kV / 110 V) |
| MS | 投入器 | Sh | 分流器 (170 kA, 20 $\mu\Omega$, 同軸形) |
| L | 限流リアクトル | F | 直径 0.5 mm の銅線 (8 本撚り) |
| Cg | サージ吸収用コンデンサ | | |

図 4-3 MCC 試験回路



- | | | | |
|-----|-------------|-----|-----------------------------|
| GEN | 短絡発電機 | Tr | 変圧器 (15 kV / 24 kV) |
| Rn | 中性点抵抗 | VT1 | 計器用変圧器 (15 kV / 100 V) |
| MB | 主遮断器 | VT2 | 計器用変圧器 (33 kV / 110 V) |
| MS | 投入器 | CT | 変流器 (4 kA / 1 A, max 63 kA) |
| L | 限流リアクトル | F | 直径 0.5 mm の銅線 |
| Cg | サージ吸収用コンデンサ | | |

図 4-4 M/C (D/G) 試験回路

4.4 測定項目

(審査ガイド抜粋【2.4 測定項目】)

HEAF 試験において電圧電流波形が測定されていることを確認する。具体的な測定項目、測定目的及び測定方法を表 1 に示す。(参考-1)

表 1 HEAF 試験の測定項目等

測定項目	測定目的	測定方法
電圧電流波形	アークパワー及びアークエネルギーを計算する。	電圧及び電流の波形を記録する。

(参考-1) その他の測定項目

本ガイドの適用範囲である、遮断器の遮断時間の設計に用いるものではないが、HEAF 試験において、火災の影響と同時に爆発の影響も評価する場合には、表 1 の測定項目のほか、HEAF を詳細に把握するため、電気盤周囲の熱流束 (NUREG/CR-6850 に規定される ZOI (電気盤の上部では 1.5m, 前面及び側面では 0.9m 離れた位置 (付録 B 参照)) の境界線上を含む複数箇所に熱流束計を設置して測定する。)、電気盤内圧力、電極の損耗量 (例えば、電極の重量減)、衝撃波 (例えば、電気盤内の圧力及び電気盤外の音圧)、電磁力、電気盤内温度、赤外線カメラや高速度カメラによる動画等のデータも同時に取得していることが望ましい。

HEAF 試験においては、「4.3 HEAF 試験に用いる電気回路」に示す変流器 (CT) 又は分流器 (Sh) により電流波形を測定し、計器用変圧器 (VT2) により電圧波形を測定している。

アークエネルギーのしきい値の評価に使用した試験について表 4-16 にまとめ、測定した電流及び電圧波形を図 4-5～図 4-8 に示す。電流波形については、アーク放電の発生直後、設定位相による直流成分が加わる (図 4-5～図 4-8 の①参照) が、時間経過とともに短絡電流目標値に近い値となっている (図 4-5～図 4-8 の②参照)。電圧波形については、アーク放電による短絡状態であり、三相合計値*で M/C : 約 1.3kV, P/C : 約 0.5kV, MCC : 約 0.7kV 及び M/C (D/G) : 約 1.3kV 程度で推移している (図 4-5～図 4-8 の③参照)。これら電圧と電流の積 (アークパワー) をアーク放電の継続時間で積分し、アークエネルギーを算出している (「4.8 アークエネルギーの計算」参照)。

また、審査ガイドの「(参考-1) その他の測定項目」に記載されている電気盤周囲の熱流束及び電気盤内圧力の測定並びに高速度カメラによる動画撮影等を実施している。

HEAF 試験時の測定項目について、表 4-17 に示す。

注記* : アークエネルギーの算出は三相合計値を用いることから、三相合計値を説明。

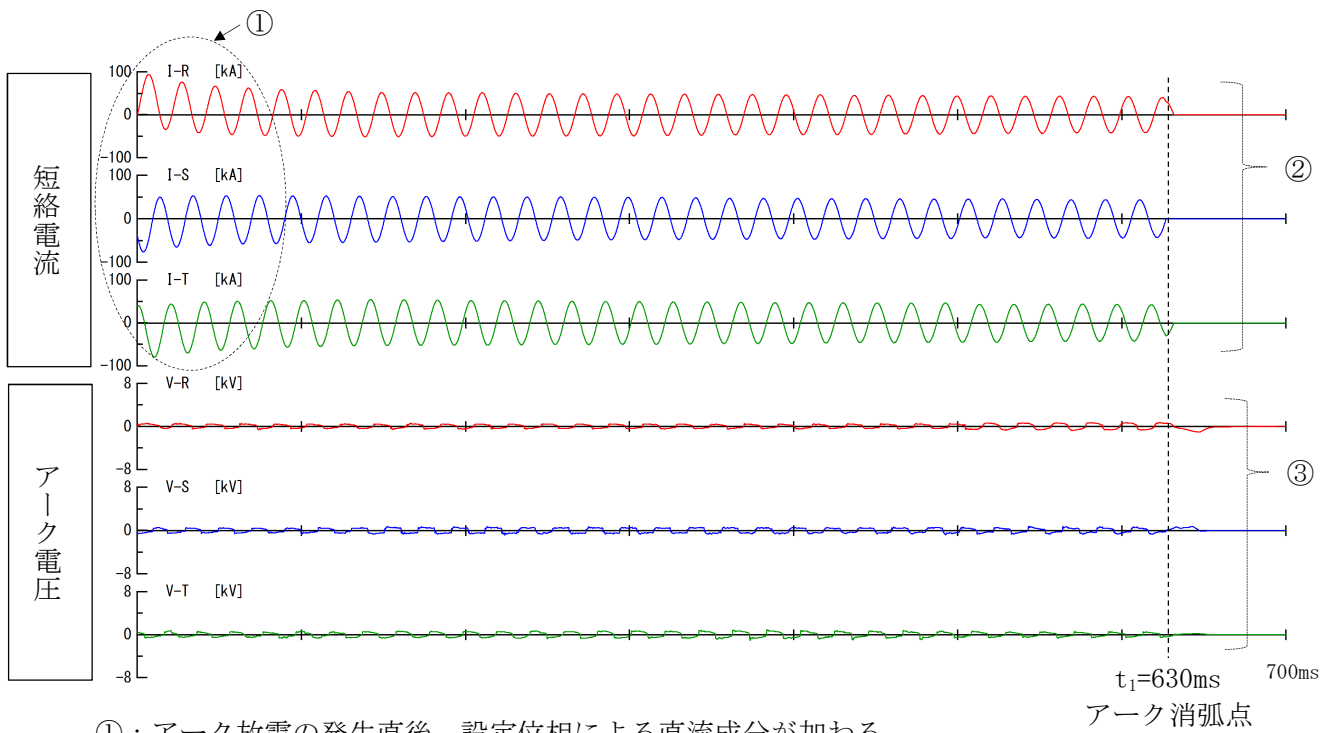
表 4-16 しきい値に係る HEAF 試験一覧表

種類	試験条件		試験結果		【参考】 電中研 試験番号
	試験初期の印可電圧	短絡電流目標値	アークエネルギー	測定波形	
M/C	8.0kV	40.0kA	25.3MJ	図 4-5	5-3*
P/C	504V	45.0kA	18.9MJ	図 4-6	7-5*
MCC	504V	45.0kA	4.49MJ	図 4-7	10-3*
M/C(D/G)	6.9kV	5kA	16.6MJ	図-4-8	9-2*

注記*：火災が発生しない最大のアークエネルギーが得られた HEAF 試験

表 4-17 HEAF 試験時の測定項目

電気盤	測定項目
M/C	電圧波形，電流波形，電気盤内圧力，高速度カメラによる動画撮影
P/C	電圧波形，電流波形，電気盤内圧力，電気盤周囲の熱流束，高速度カメラによる動画撮影
MCC	電圧波形，電流波形，電気盤内圧力，電気盤周囲の熱流束，高速度カメラによる動画撮影
M/C(D/G)	電圧波形，電流波形，電気盤内圧力，電気盤周囲の熱流束，高速度カメラによる動画撮影



- ①：アーク放電の発生直後，設定位相による直流成分が加わる。
- ②：時間経過とともに短絡電流目標値に近い値となっている。
- ③：アーク放電による短絡状態であり，三相合計値で約 1.3kV 程度で推移している。

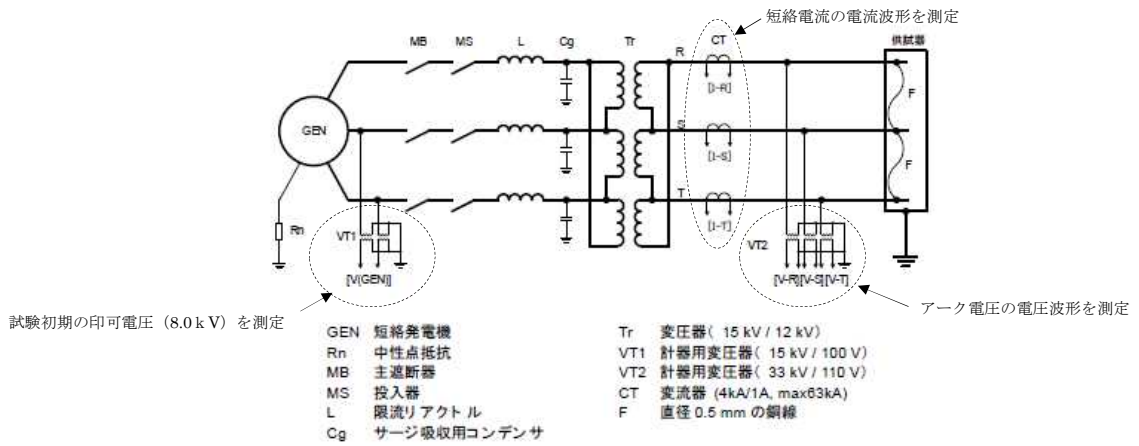
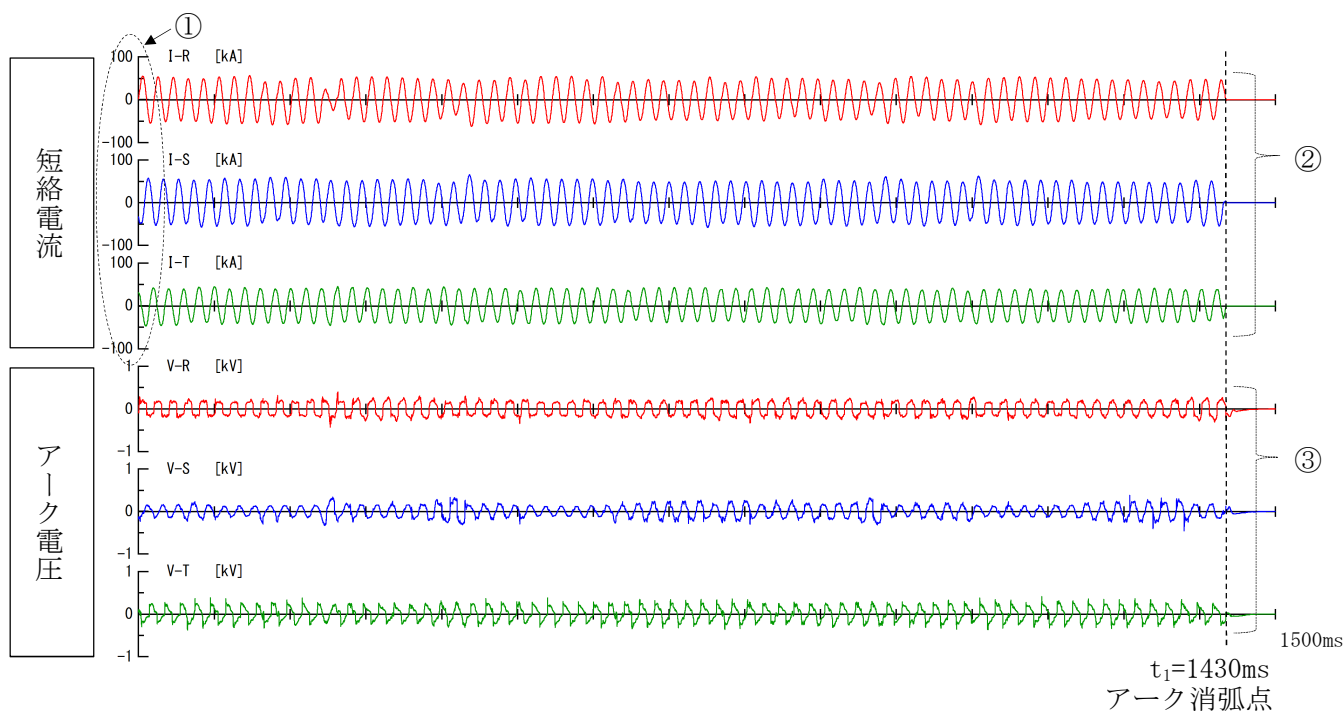


図 4-5 HEAF 試験時の電圧・電流波形 (M/C)



- ①：アーク放電の発生直後，設定位相による直流成分が加わる。
- ②：時間経過とともに短絡電流目標値に近い値となっている。
- ③：アーク放電による短絡状態であり，三相合計値で約 0.5kV 程度で推移している。

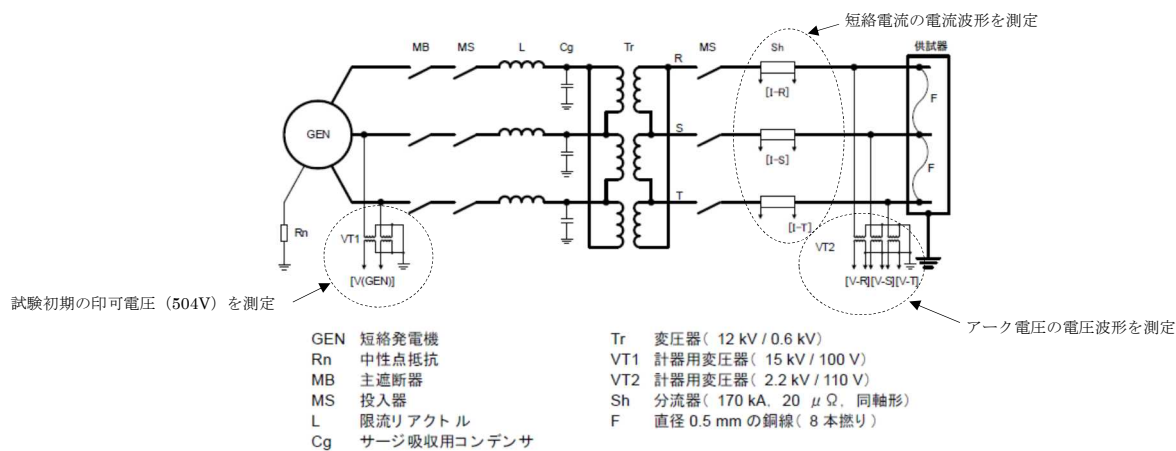
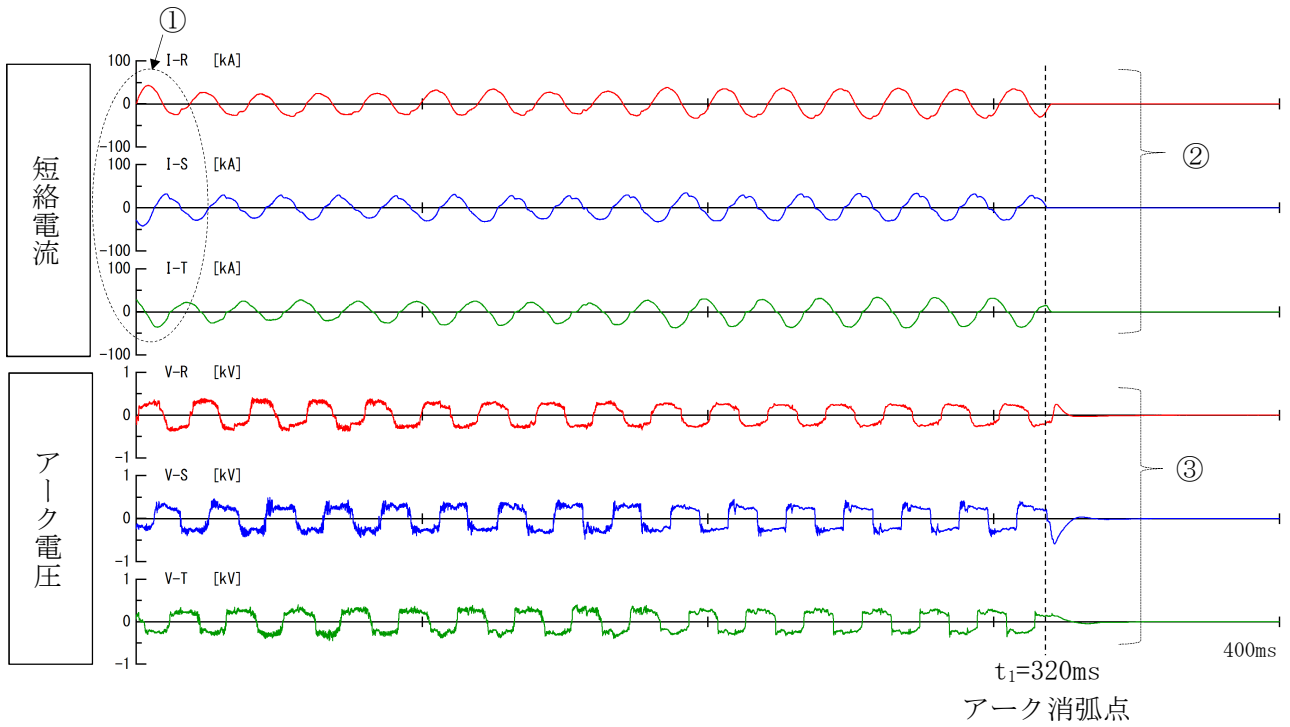


図 4-6 HEAF 試験時の電圧・電流波形 (P/C)



- ①：アーク放電の発生直後，設定位相による直流成分が加わる。
- ②：時間経過とともに短絡電流目標値に近い値となっている。
- ③：アーク放電による短絡状態であり，三相合計値で約 0.7kV 程度で推移している。

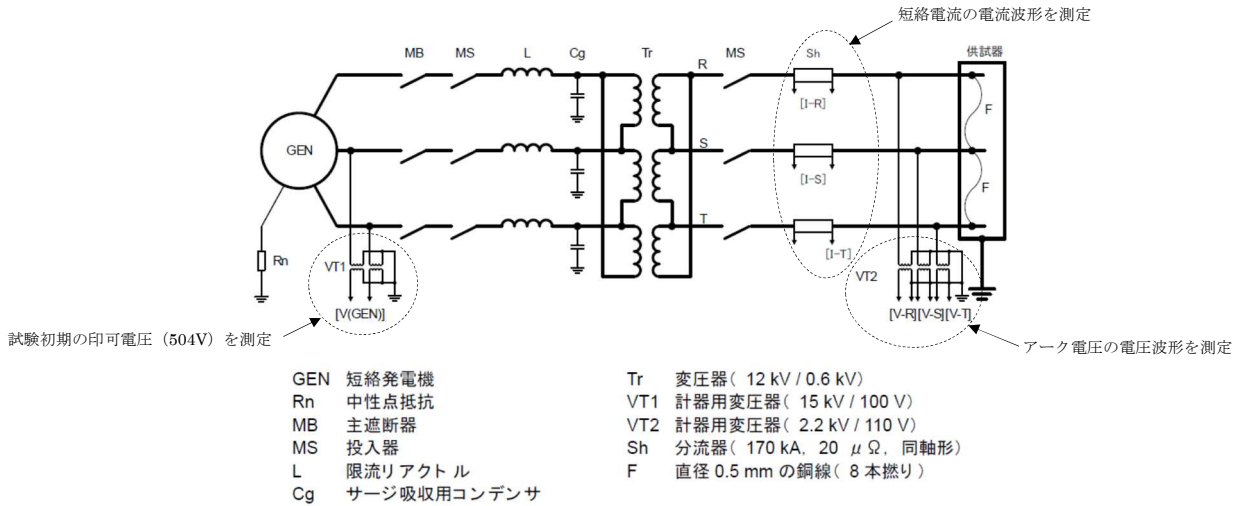
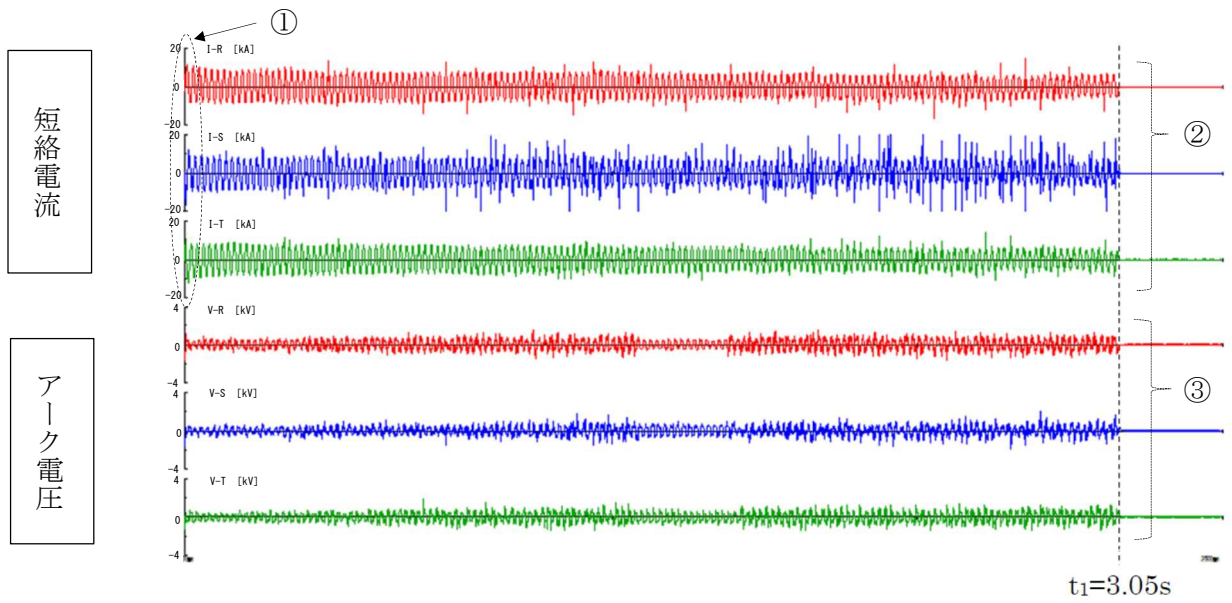


図 4-7 HEAF 試験時の電圧・電流波形 (MCC)



- ①：アーク放電の発生直後，設定位相による直流成分が加わる。
- ②：時間経過とともに短絡電流目標値に近い値となっている。
- ③：アーク放電による短絡状態であり，三相合計値で約 1.3kV 程度で推移している。

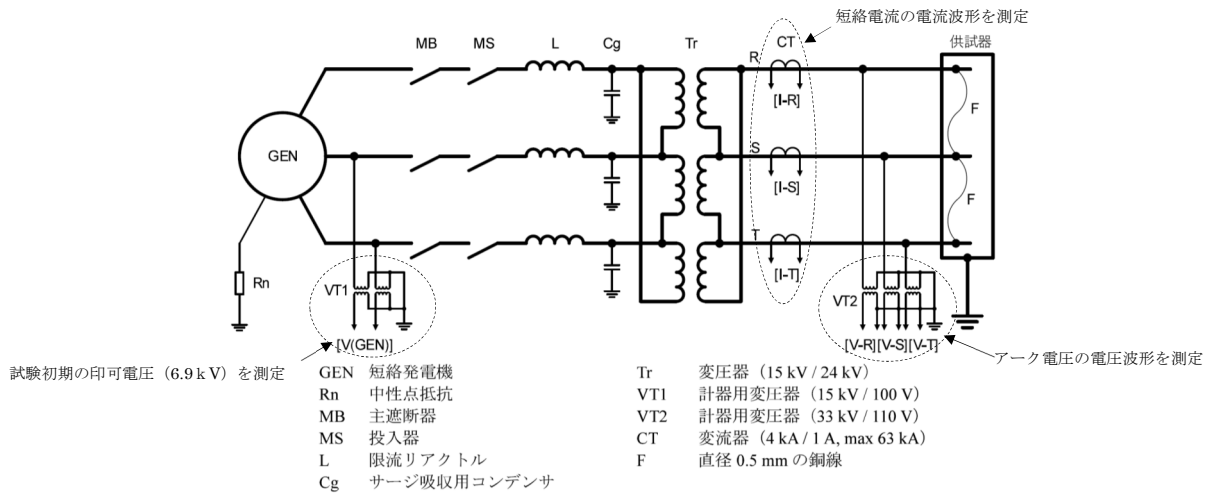


図 4-8 HEAF 試験時の電圧・電流波形 (M/C(D/G))

4.5 アーク放電の発生方法

(審査ガイド抜粋【2.5 アーク放電の発生方法】)

アーク放電を発生させる試験が、電気盤の遮断器の受電側及び配電側で実施されていることを確認する。アーク放電は、IEEE C37.20.7-2007 等に基づき、母線に導電性針金をワイヤリングした後、2.2 から 2.4 の試験条件で大電流を流し三相短絡させて発生させていることを確認する。

電気盤の遮断器の受電側及び配電側でアーク放電を発生させて試験を実施している。(図 4-9～図 4-12 参照) なお、MCC については、遮断器の配電側でアーク放電を発生させた場合、当該遮断器によって 0.1 秒以下で遮断され、審査ガイドに基づき適切に HEAF 対策ができているものと判断されることから、配電側でアーク放電を発生させて試験は実施していない。



図 4-9 遮断器の短絡箇所 (M/C 試験時)

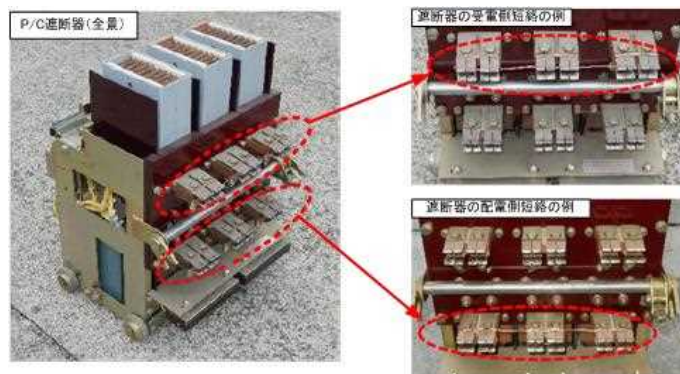


図 4-10 遮断器の短絡箇所 (P/C 試験時)



図 4-11 遮断器の短絡箇所 (MCC 試験時)

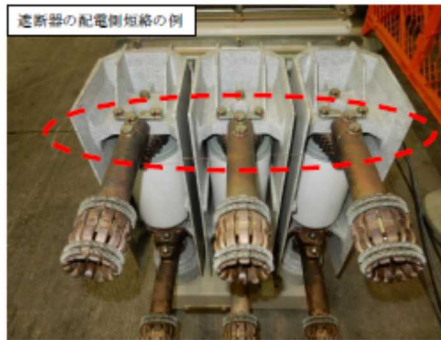
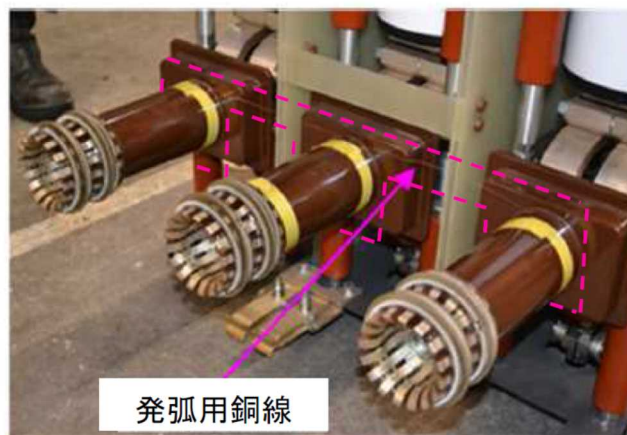


図 4-12 遮断器の短絡箇所 (M/C(D/G)試験時)

ワイヤリングは、直径 0.5mm の銅線 (M/C : 1 本撚り, P/C, MCC : 8 本撚り) を張り、試験電流を通電することで溶断発弧させた。銅線の選定は以下の国際規格を参考に決定した。

- ・ M/C, M/C (D/G) . . . JEM-1425 (2011), IEC62271-200 (2011)
- ・ P/C, MCC . . . IEC/TR61641 (2008)



発弧線の設置状況 (遮断器 2 次側端子)

- ・ IEEE C37.20.7-2007 の抜粋

5.3 Arc initiation

For equipment defined by IEEE Std C37.20.1-2002: The arc shall be initiated by means of a metal wire 2.6 mm in diameter or 10 AWG.

For equipment defined by IEEE Std C37.20.2-1999 and IEEE Std C37.20.3-2001: The arc shall be initiated by means of a metal wire 0.5 mm in diameter or 24 AWG.

IEEE C37.20.1-2002 (Low-voltage switchgear AC254V~635V) で定義されている装置に関して、アークは直径 2.6mm 又は 10AWG の金属線によって発弧されなければならない。

IEEE C37.20.2-1999 (metal-clad switchgear AC5kV~35kV) で定義されている装置に関して、アークは直径 0.5mm 又は 24AWG の金属線によって発弧されなければならない。

・ JEM-1425(2011)の抜粋

アークは、直径約 0.5mm の金属線によって相間（相分割導体の場合は、一相と接地との間）で点弧することが望ましい。

・ IEC62271-200(2011)の抜粋

The arc shall be initiated between all the phases under test by means of a metal wire of about 0.5mm in diameter...

（アークは、直径約 0.5mm の金属線によって試験対象となる全ての相間で点弧するものとする。）

・ IEC /TR61641(2008)の抜粋

The arc is initiated between the phases without connection to earth by means of a bare copper ignition wire connecting the adjacent conductors across the shortest distance, and connected to three phases.

（裸銅線によって隣接導体を最短距離で接続することにより、接地されていない相間にアークを点弧させる。）

With regard to the test current, the sizes of the copper ignition wire given in Table1 should be used.

（試験電流に関しては、表 1 に示される銅線のサイズを使用すべき。）

Table1 - Sizes of the copper ignition wire
without current limiting protection device

Test current (rms value) kA	Wire size mm ²
≤25	0.75
>25 ≤40	1.0
>40	1.5

（※P/C の試験電流は 45kA なので、銅線の太さは 1.5mm² となる。直径 0.5mm の銅線を使用した場合、1.5mm² を確保するために 8 本撚りとしている。

($0.5 \times 0.5 \times \pi \div 4 \times 8 \text{ 本} = 1.57\text{mm}^2$)

4.6 アーク放電の継続時間

(審査ガイド抜粋【2.6 アーク放電の継続時間】)

アーク放電の継続時間を設定する際には、所内で実際に使用している継電器の設定時間を踏まえ、目標とするアークエネルギーの値が得られるよう、設定されていることを確認する。また、HEAF試験により得られた電圧電流波形から、アーク放電の継続時間を求めていることを確認する。

アーク放電の継続時間については、柏崎刈羽原子力発電所第7号機で使用している保護継電器の対策後の設定値を踏まえたアークエネルギーの最大値（目標とするアークエネルギー）以上のアークエネルギーが得られるよう、段階的にアーク放電の継続時間を設定している。（表4-18 参照）

また、HEAF試験で得られた電圧電流波形から、三相短絡が継続している間をアーク放電の継続時間（ t_1 ）として求めている。（図4-5～図4-8 参照）

表 4-18 HEAF 試験条件及び試験結果 (1/2)

種類	電気盤	試験初期の 印可電圧	試験初期の 印可電流	アーク放電の 継続時間 (sec)		アーク エネルギー (MJ)	アーク 火災 有無	目標とするアーク エネルギー (柏崎刈羽原子力発 電所第7号機の 最大値) (MJ)	【参考】 電中研 試験番号	
				設定値	実測値					
M/C	試験体 ①	6.9kV	18.9 kA	0.1	0.103	3.09	無	22	1-1	
				0.3	0.302	8.17	無		1-2	
				0.5	0.527	12.9	無		2-1	
				0.5	0.526	10.4	無		2-2	
				1.0	1.23	24.7	無		3-1	
				1.0	1.23	20.3	無		3-2	
				1.0	1.23	27.6	有		3-3	
				2.0	2.18	41.8	有		3-4	
				2.0	2.39	44.6	有		4-1	
				1.0	1.23	17.7	無		4-2	
	試験体 ②	8.0 kV	40.0 kA	0.2	0.22	12.8	無	5-1		
				0.2	0.21	8.68	無	5-2		
				0.6	0.63	25.3	無	5-3		
P/C	試験体 ③	504V	45kA	0.2	0.20	2.49	無	16	6-1	
				0.5	0.51	6.34	無		6-2	
				1.5	1.53	19.8	有		6-3	
				1.0	0.18	2.91	無		6-4	
				試験体 ④	1.3	0.43	5.76		無	7-1
					1.3	0.06	0.88		無	7-2
					1.3	0.02	0.34		無	7-3
	試験体 ⑤	1.3	1.32	18.5	無	7-4				
		1.4	1.43	18.9	無	7-5				
		1.3	1.32	17.4	無	8-1				
	MCC	試験体 ⑥	504V	45kA	0.1	0.06	0.9	無	3.8	10-1
					0.5	0.52	7.56	有		10-2
					0.3	0.32	4.49	無		10-3
0.21					0.07	1.02	無	11-1		
0.28					0.15	2.24	無	11-2		
0.28					0.05	0.80	無	11-3		
0.28					0.28	3.94	無	11-4		

：火災が発生した最小のアークエネルギー

：火災が発生しない最大のアークエネルギー

表 4-18 HEAF 試験条件及び試験結果 (2/2)

種類	電気盤	試験初期の 印可電圧	試験初期の 印可電流	アーク放電の 継続時間 (sec)		アーク エネルギー (MJ)	アーク 火災 有無	目標とするアーク エネルギー (柏崎刈羽原子力発 電所第7号機の 最大値) (MJ)	【参考】 電中研 試験番号
				設定値	実測値				
M/C (D/G)	試験体 ⑦	6.9kV	5kA	2.65	2.69	14.7	無	14	9-1
				3.00	3.05	16.6	無		9-2
				6.10	6.27	32.3	有		9-3

6.10 : 火災が発生した最小のアークエネルギー

3.00 : 火災が発生しない最大のアークエネルギー

4.7 HEAF 試験の実施

(審査ガイド抜粋【2.7 HEAF 試験の実施】)

HEAF 試験は 2.1 で選定した電気盤を用いて実施されていることを確認する。初期の電圧及び電流値として 2.2 で設定した値が用いられていることを確認する。また、HEAF 試験時の電圧及び電流値は電気盤よりも受電側で測定されていることを確認する。さらに、アーク放電の継続時間を変化させ、アーク火災が発生する場合としない場合の、それぞれのアーク放電の継続時間が得られていることを確認する。

HEAF 試験は、「4.1 電気盤の選定」にて選定した電気盤を用いて実施した。

HEAF 試験の初期の電圧及び電流値として「4.2 短絡電流の目標値」にて設定した値を用いて、以下の通り試験を実施した。

表 4-19 電力中央研究所 HEAF 試験結果 (M/C の一例)

試験番号	発弧箇所	試験電圧 ¹⁾ (kV)	相別	試験電流					通電時間 (s)	最大アークパワー (MW)	全アークエネルギー (MJ)	内部圧力			破損状況
				最大波高値 (kA)	初期3半端実効値 (kA)	最終実効値 (kA)	AC成分の時間積分値 (kA・s)	投入位相 ²⁾ (deg)				測定箇所	最大値 (kPa)	到達時間 ³⁾ (ms)	
5-1	盤 I 上段 VCB 二次側端子 ⁴⁾	8.25	R	86.6	42.0	35.6	7.23	318	0.22	157	12.8	盤 I 上段ケーブル室	89.3	9.0	・天板一部外れ (M10 ボルト 3 箇所破断) ・背面扉開放 (M16 ボルト 2 箇所破断) ・側板変形 ・母線室と VCB 室の仕切り板 2 枚外れ ・燃焼継続せず
			S	74.9	42.8	36.2	7.69	267							
			T	75.9	41.6	36.3	7.70	267							
5-2	盤 I 下段 VCB 室内ターミナル部 ⁵⁾	8.24	R	94.1	41.9	35.3	7.18	318	0.21	84.9	8.68	盤 I 下段ケーブル室	58.9	8.6	・天板変形 (M10 ボルト破断無) ・背面扉開放無 ・正面下扉変形 ・母線室と VCB 室の仕切り板 2 枚変形 ・燃焼継続せず
			S	77.7	42.9	36.7	7.35	267							
			T	78.8	42.2	36.4	7.74	267							
5-3	盤 J 下段 VCB 室内ターミナル部 ⁶⁾	8.23	R	94.0	42.2	29.4	19.0	318	0.63	87.4	25.3	盤 D 上段 VCB 室	62.5	14.5	・天板変形 (M10 ボルト 2 箇所破断) ・背面扉開放無 ・正面下扉変形 ・母線室と VCB 室の仕切り板 2 枚変形 ・燃焼継続せず
			S	76.3	42.7	30.9	19.3	266							
			T	80.3	42.0	30.1	19.7	266							

備考

- 1) 発電機電圧より換算した値(参考値) 2) 発電機電圧(S-T相)を基準とした位相角
 3) 内部圧力上昇値が、通電開始から最大値に達するまでの時間(100Hzのローパスフィルターを適用)
 4) 全ての VCB 投入状態
 5) 盤 I 上段 VCB を除く他の VCB 投入状態
 6) 盤 J 下段 VCB のみ VCB 投入状態(盤 I と盤 J の間の母線を切断)

5-3 : 火災が発生しない最大のアークエネルギーが得られた HEAF 試験

表 4-20 電力中央研究所 HEAF 試験結果 (P/C の一例)

非耐震/高岳製作所製 低圧電気盤の試験結果詳細データ一覧 (2/2)

試験番号	発弧箇所	試験電圧 ¹⁾ (V)	相別	試験電流					通電時間 (s)	最大アークパワー (MW)	全アークエネルギー (MJ)	内部圧力			破損状況
				最大波高値 (kA)	初期3半端実効値 (kA)	最終実効値 (kA)	AC成分の時間積分値 (kA・s)	投入位相 ²⁾ (deg)				測定箇所	最大値 (kPa)	到達時間 ³⁾ (ms)	
7-4	フィーダ盤 O 下段 ACB 室内一次側端子 ⁴⁾	504	R	60.2	37.3	24.5	38.4	133	1.32	25.3	18.5	フィーダ盤 O 下段 正面	1.68	4.71	・燃焼継続せず ・盤 O と盤 M の下段 ACB 室の裏側の一次側端子がアークにより溶断
			S	60.8	38.0	30.9	41.9	87							
			T	51.1	29.0	28.9	32.6	87							
7-5	フィーダ盤 P 上段 ACB 室内一次側端子 ⁵⁾	504	R	62.2	38.7	32.8	43.7	133	1.43	20.3	18.9	フィーダ盤 P 上段 正面	1.27	4.04	・燃焼継続せず ・盤 P の上,中,下段 ACB 室の裏側の一次側端子がアークにより溶断
			S	65.6	38.2	37.3	46.5	89							
			T	47.3	31.3	25.6	35.5	89							

備考

- 1) 発電機電圧より換算した値(参考値)
- 2) 発電機電圧(S-T相)を基準とした位相角
- 3) 内部圧力上昇値が、通電開始から最大値に達するまでの時間(100Hzのローパスフィルターを適用)
- 4) フィーダ盤 O 下段 ACB と受電盤 M 中段 ACB 投入、フィーダ盤 O 上・中段 ACB と受電盤 M 下段 ACB 開放
- 5) フィーダ盤 P 上段 ACB と受電盤 M 中段 ACB 投入、フィーダ盤 P 中・下段 ACB と受電盤 M 下段 ACB 開放

試験実施日、温度、湿度
 試験 7-4 : 2017/8/8、32℃、54%
 試験 7-5 : 2017/8/10、30℃、64%

7-5 : 火災が発生しない最大のアークエネルギーが得られた HEAF 試験

表 4-21 電力中央研究所 HEAF 試験結果 (MCC の一例)

試験結果詳細データ一覧 (1/2)

温度 : 34~40 °C、湿度 : 50~58 %

試験番号	発弧箇所	試験電圧 ¹⁾ (V)	相別	試験電流					通電時間 (s)	最大アークパワー (MW)	全アークエネルギー (MJ)	内部圧力			備考
				最大波高値 (kA)	初期3半端実効値 (kA)	最終実効値 (kA)	AC成分の時間積分値 (kA・s)	投入位相 ²⁾ (deg)				測定箇所	最大値 (kPa)	到達時間 ³⁾ (ms)	
10-1	盤 Z 2 段目 MCCB 一次側	507	R	47.4	29.0	14.1	1.55	143	0.06	30.3	0.90	盤 Z 正面	26.0	3.10	・0.06 s で消弧 ・正面と背面扉が開放 ・火災の発生なし ・2 段目 MCCB 一次側ケーブルが溶断し、5 段目 MCCB 一次側が溶損
			S	54.6	30.9	15.0	1.66	84							
			T	42.5	26.1	9.38	1.37	84							
10-2	盤 Y 7 段目 MCCB ユニットと母線の接続箇所	515	R	53.2	23.9	21.4	11.19	128	0.52	28.0	7.56	盤 Y 正面	19.5	2.42	・正面と背面扉が開放 ・火災の発生あり ・通電開始から 7 分 10 秒で消火 ・1~7 段目 MCCB 一次側ケーブルが溶断 ・垂直母線の下部が溶損
			S	62.8	23.7	20.6	10.61	69							
			T	50.3	21.6	20.8	10.22	69							
10-3	盤 Z 4 段目 MCCB ユニットと母線の接続箇所 ⁴⁾	515	R	42.8	21.0	23.7	6.46	140	0.32	23.1	4.49	盤 Z 正面	16.7	2.82	・正面と背面扉が開放 ・火災の発生なし ・4 段目 MCCB 一次側ケーブルが溶断 ・垂直母線の下部が溶損
			S	42.0	24.5	21.0	6.29	82							
			T	37.3	21.6	23.5	5.93	82							

備考

- 1) 発電機電圧より換算した値(参考値)
- 2) 発電機電圧(S-T相)を基準とした位相角
- 3) 内部圧力上昇値が、第一相の通電開始から最大値に達するまでの時間(500 Hz のローパスフィルターを適用)
- 4) 試験番号 10-1 で使用した盤 Z を清掃し、相間および対地間の絶縁性能を回復させた。なお、5 段目の MCCB ユニットと母線を接続する部品については、確実に絶縁回復させるために取り外した。

10-3 : 火災が発生しない最大のアークエネルギーが得られた HEAF 試験

表 4-22 電力中央研究所 HEAF 試験結果 (M/C(D/G) の一例)

試験結果詳細データ一覧

温度：20～23℃、湿度：78～84%

試験番号	発弧箇所	試験電圧 ¹⁾ (kV)	相別	試験電流					通電時間 (s)	最大アーク パワー (MW)	全アーク エネルギー (MJ)	内部圧力			破損状況
				最大 波高値 (kA)	初期 3 半端 実効値 (kA)	最終 実効値 (kA)	AC 成分の 時間積分値 (kA・s)	投入 位相 ²⁾ (deg)				測定 箇所	最大 値 (kPa)	到達 時間 ³⁾ (ms)	
9-1	フィーダ盤 V 上段 VCB 室内 二次側端子 ⁴⁾	6.96	R	11.7	6.82	4.32	12.54	164	2.69	17.2	14.7	フィーダ 盤 V 上段 正面	4.24	8.33	・火災の発生なし ・発弧箇所の VCB 室以 外に損傷なし
			S	10.2	6.77	3.95	12.43	93							
			T	10.8	6.62	3.88	12.11	93							
9-2	フィーダ盤 W 上段 VCB 室内 二次側端子 ⁵⁾	6.97	R	11.6	7.02	4.16	13.98	164	3.05	14.9	16.6	フィーダ 盤 W 上段 正面	2.98	8.24	・火災の発生なし ・発弧箇所の VCB 室以 外に損傷なし
			S	10.3	6.79	4.16	13.87	91							
			T	10.7	6.63	3.75	13.34	91							
9-3	受電盤 U 下段 VCB 室内 二次側端子 ⁶⁾	6.96	R	11.7	6.84	3.31	24.17	163	6.27	14.4	32.3	受電 盤 U 下段 正面	2.70	6.41	・火災の発生あり ・試験開始から 44 分で 消火活動開始。 ・VCB 室と母線室間の パンチング 材が溶損 ・母線の溶損なし
			S	9.91	6.79	2.83	24.05	95							
			T	11.1	6.66	2.85	22.67	95							

備考

- 1) 発電機電圧より換算した値(参考値) 2) 発電機電圧(S-T 相)を基準とした位相角
 3) 内部圧力上昇値が、三相の通電開始から最大値に達するまでの時間(500Hz のローパスフィルターを適用)
 4) フィーダ盤 V 上段 VCB と受電盤 U 下段 VCB 投入、フィーダ盤 V 下段断路器を開放
 5) フィーダ盤 W 上段 VCB と受電盤 U 下段 VCB 投入、フィーダ盤 W 下段 VCB を開放
 6) 受電盤 U 下段 VCB 投入、受電盤 U とフィーダ盤 W の接続母線をフィーダ盤 W 側において切断

9-2 : 火災が発生しない最大のアークエネルギーが得られた HEAF 試験

また、図 4-1～図 4-4 に示すとおり、HEAF 試験時の電圧及び電流値は、電気盤よりも受電側の電圧計(図中の VT2)及び電流計(図中の CT 又は Sh)で測定している。

更に、表 4-18 に示す通り、M/C、P/C、MCC 及び M/C(D/G)のそれぞれに対して、アーク火災が発生する場合としない場合の、それぞれのアーク放電の継続時間が得られている。

4.8 アークエネルギーの計算

(審査ガイド抜粋【2.8 アークエネルギーの計算】)

HEAF 試験におけるアークエネルギー (J) は、アークパワー (W) をアーク放電の継続時間 (s) で積分した値としていることを確認する。

HEAF 試験におけるアークエネルギーは、アークパワーをアーク放電の継続時間で積分した値としており、以下の式にて算出している。

$$E_1 = \int_0^{t_1} W_1 dt$$

E_1 : 三相のアークエネルギー W_1 : アークパワー t_1 : アーク放電の継続時間

しきい値の決定に係る HEAF 試験のアークパワー、アークエネルギーの算出結果 (M/C, P/C, MCC, 及び M/C(D/G)) を表 4-19～表 4-22 に示す。

5. アーク火災発生の評価

5.1 アーク火災発生の評価の概要

電気盤においてアーク火災が発生する場合には、アーク放電発生の数秒から数分後に目視によりアーク火災発生状況を確認できる。また、電気盤周囲の熱流束を測定することによってもアーク火災の発生を確認できる。

アーク火災発生の有無とアークエネルギーの関係を評価することにより、アーク火災が発生する場合の電気盤固有のアークエネルギーのしきい値を求めることができる。

5.2 評価に用いる必要なデータ

(審査ガイド抜粋【3.2 評価に用いる必要なデータ】)

アーク火災評価には、アークエネルギー [J] 及びアーク放電の継続時間 [s] を用いる。なお、これらのデータについては、信頼性のある試験（事業者自らが直接行った試験に限らない。）に基づくものであることを確認すること。（解説-1）

HEAF 試験は、電力中央研究所に委託して実施しており、試験を実施した大電力試験所は、ISO/IEC17025 (JIS Q 17025) (校正機関及び試験所能力に関する一般要求事項) に適合する試験所として、公益財団法人 日本適合性認定協会から「試験所認定」を取得していることから、評価に用いたデータは、信頼性のある試験に基づくものである。

【参考】電力中央研究所ホームページより抜粋

(<https://criepi.denken.or.jp/jp/hpt1/quality.html>)

電力中央研究所
電力技術研究所 大電力試験所

最終更新日 2018 年 5 月 28 日

[トップ](#) | [品質方針](#) | [試験業務](#) | [試験設備](#) | [組織](#) | [アクセス](#) | [パンフレット](#) | [English](#) |



トップマネジメントによる品質方針と目標

「常に信頼性の高い試験結果を提供することにより、依頼者の満足を得るとともに、電気事業、引いては社会の発展に寄与する」ため、『JIS Q 17025』および公益財団法人 日本適合性認定協会が発行する『試験所及び校正機関 認定基準』に適合した試験所システムを構築・運用するとともに、運用に必要な経営資源の適正化を図ることを、品質方針とする。

大電力試験所の経営管理に当たっては、この品質方針のもと、下記を目標とする。

1. 品質目標を適切に設定し、品質確保に努める。
2. 大電力試験所の全ての職員に、品質方針を周知励行させる。
3. 大電力試験所の全ての職員が、品質規程に精通し、かつ、方針および手順を遵守して業務を遂行する。
4. マネジメントシステムの構築および実施、ならびに継続的改善に万全を期す。
5. マネジメントシステムの適切性および有効性を確認するため、毎年 1 回、見直しを行う。
6. 大電力試験所の全ての職員も、横須賀運営センター環境マネジメントシステムの『環境方針』を遵守し、関連業務を遂行する。

一般財団法人 電力中央研究所
電力技術研究所長

5.3 アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値に係る評価

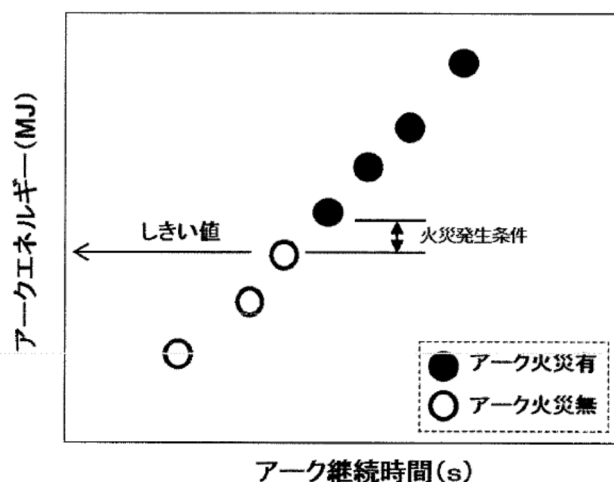
【審査ガイド抜粋【3.3 アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値に係る評価】】

電気盤においてアーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値（以下単に「しきい値」という。（解説-3））を求める際には、アーク火災発生の有無とその時のアークエネルギーとの関係性を評価する。しきい値が、HEAF 試験においてアーク火災が発生しなかった場合の最大のアークエネルギー値となっていること及びアーク火災が発生した全てのアークエネルギー値を下回っていることを確認する。ただし、HEAF 試験の結果、火災の発生に至らないと判断された場合は、しきい値の算定は不要である。（解説-4）

（解説-3）しきい値

アーク火災が発生する場合の電気盤固有の真のしきい値（実際に火災が発生するしきい値）は、アーク火災が発生した時の値と発生しなかった時の値の間に存在する。（付録D 参照）

付録D アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値に係る評価の例



（解説-4）火災の発生に至らないと判断された場合について

HEAF 試験の結果、アーク火災の発生に至らない場合がある（例えば、小型の電気盤などにおいて内部の構成部品が吹き飛び、通電できなくなることでアークエネルギーが比較的小さい値になる等）。この様な場合には、しきい値が存在しないことから、その算定は不要とする。

HEAF 試験により M/C、P/C、MCC 及び M/C(D/G) の電気盤において、それぞれ図 5-1～図 5-4 に示す試験結果が得られ、しきい値の設定については、それぞれの測定誤差を保守的に考慮した上で、更に端数を切捨てて、それぞれの電気盤においてしきい値（M/C:25MJ、P/C:18MJ、MCC:4.4MJ 及び M/C(D/G):16MJ）を決定した。（表 5-1 参照）

また、しきい値が、HEAF 試験においてアーク火災が発生しなかった場合の最大のアークエネルギー値より保守的な値となっていること（表 5-1②及び③参照）及びアーク火災が発生した全てのアークエネルギー値を下回っていること（表 5-1①及び③参照）を確認した。（HEAF 試験によって得られた全てのアークエネルギー及び火災の発生有無については、表 4-18 参照）

なお、アーク火災発生判定については、以下の方法により実施した。

- アーク放電後，電気盤の盤外に対する炎の有無を目視により確認
- 盤外に炎が見られない時は
 - (1) 盤の扉を開けて内部を目視にて直接確認
 - ⇒M/C, P/C 耐震盤
 - (2) 電気盤の発熱速度 (HRR) の測定により，発熱速度の継続的な上昇の有無を確認
 - ⇒(1)以外

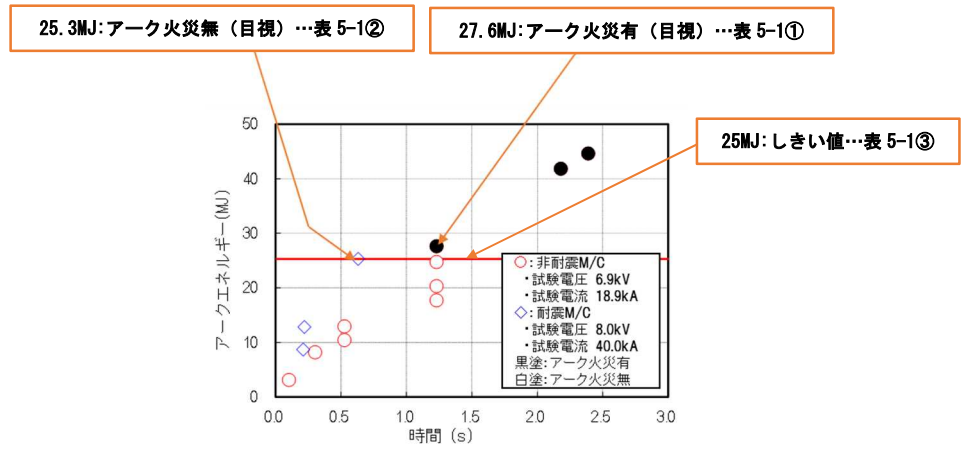


図 5-1 M/C 試験結果

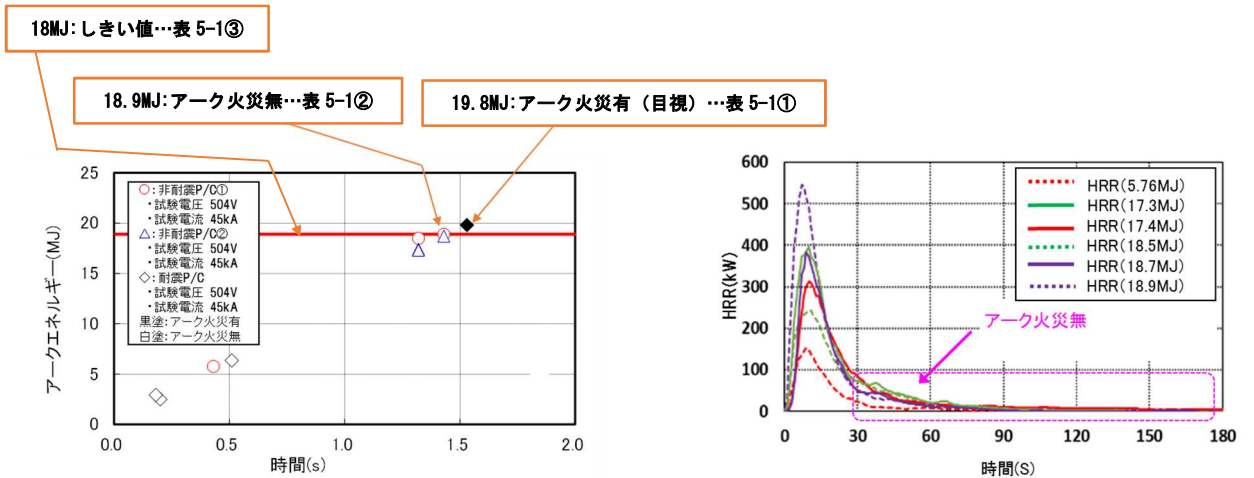


図 5-2 P/C 試験結果

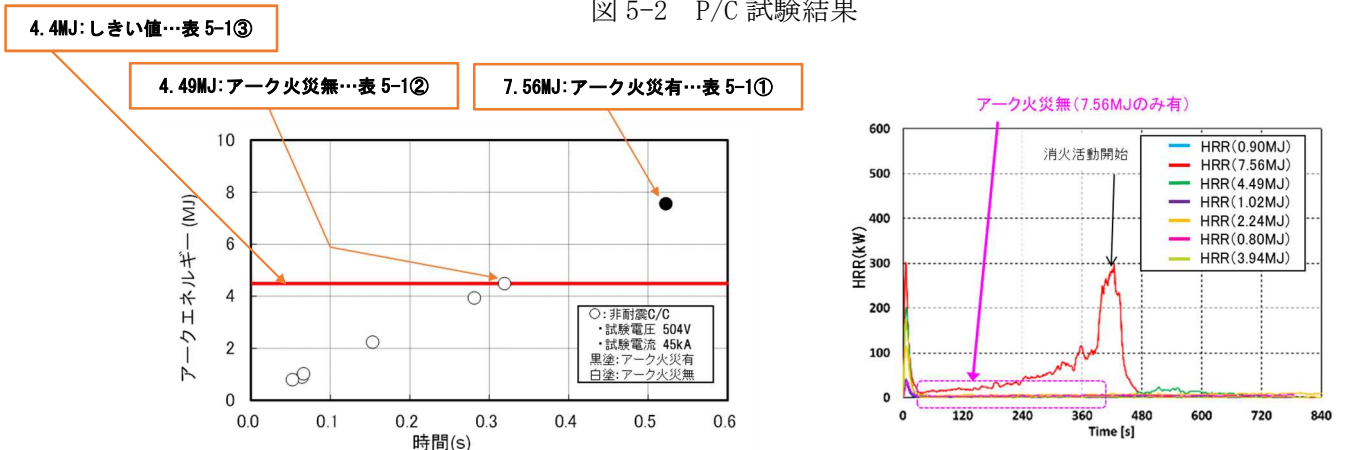


図 5-3 MCC 試験結果

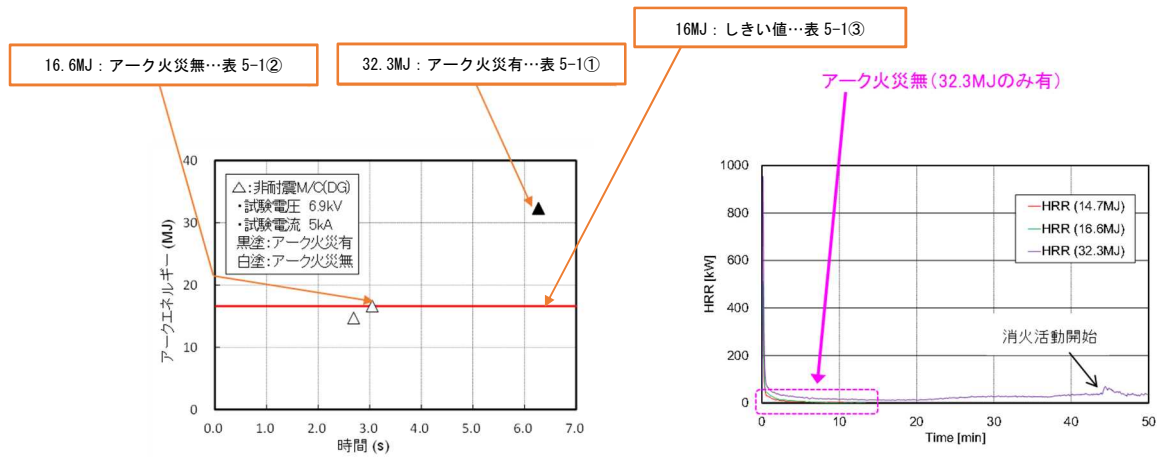


図 5-4 M/C(D/G) 試験結果

表 5-1 測定誤差を考慮したしきい値の設定

	①アーケ火災が発生した 最小のアーケ エネルギー (MJ)	②アーケ火災が発生しなかった 最大のアーケ エネルギー (MJ)	測定誤差 (%)	測定誤差を 含む ②の値 (MJ)	③しきい値 (MJ)
M/C* ¹	27.6	25.3	0.8	25.09	25
P/C* ²	19.8	18.9	0.6	18.78	18
MCC* ³	7.56	4.49	0.6	4.46	4.4
M/C(D/G)* ⁴	32.3	16.6	0.8	16.46	16

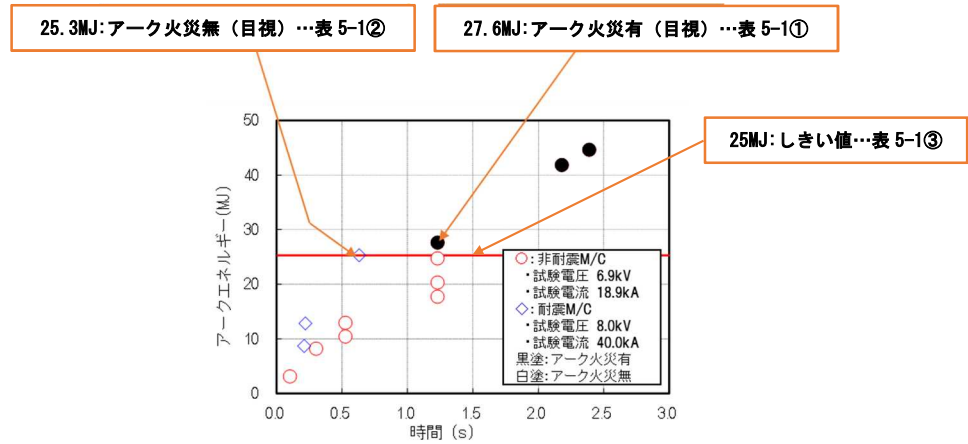
注記*1 : ①, ②及び③の図示については図 5-1 参照。

*2 : ①, ②及び③の図示については図 5-2 参照。

*3 : ①, ②及び③の図示については図 5-3 参照。

*4 : ①, ②及び③の図示については図 5-4 参照。

《しきい値設定の例示(M/C)》



- ・しきい値【表 5-1③】が，HEAF 試験においてアーク火災が発生しなかった場合の最大のアークエネルギー値【表 5-1②】より保守的な値となっている

$$25.3\text{MJ} \times (1 - 0.008) = 25.09 \approx 25\text{MJ}$$

$$25\text{MJ} \text{【表 5-1③】} < 25.3\text{MJ} \text{【表 5-1②】}$$

- ・しきい値【表 5-1③】が，アーク火災が発生した全てのアークエネルギー値【最小値は表 5-1①】を下回っている

$$25\text{MJ} \text{【表 5-1③】} < 27.6\text{MJ} \text{【表 5-1①】}$$

5.4 しきい値に係る解析による評価

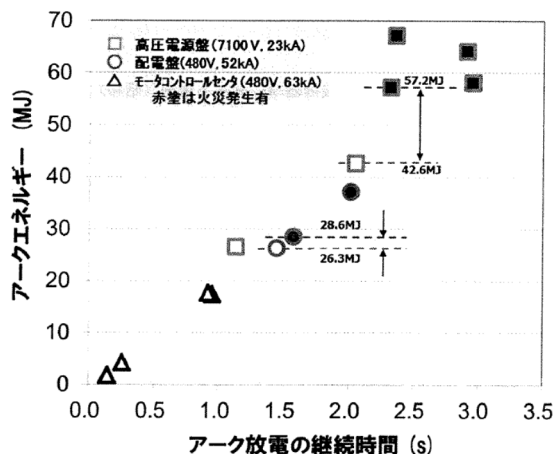
(審査ガイド抜粋【3.4 しきい値に係る解析による評価】)

しきい値については、HEAF 試験の結果に基づく解析によって評価してもよい。その際には、電気盤内の空間容積や密閉性、定格電圧や短絡電流値の大小等を考慮した条件設定が行われていることを確認する。(解説-5)

(解説-5) 空間容積や密閉性の考慮の必要性

過去に原子力規制庁が実施した HEAF 試験において、電気盤内の空間容積や密閉性によって、アーク火災の発生に必要なアークエネルギーが大きく異なることが示された。これより、アーク火災の発生に必要なアークエネルギーは、電気盤内の空間容積の大小や密閉性の高低と関係するといえる。(付録 E 参照)

付録 E 原子力規制庁の HEAF 試験結果の一例



しきい値については、解析による評価は用いず、HEAF 試験の結果により評価し決定した。

なお、解説-5「空間容積や密閉性の考慮の必要性」については、M/C、P/C 及び MCC のそれぞれにおいて電気盤内の空間容積や密閉性の差があることから、それぞれ HEAF 試験を実施し、その結果より評価しアークエネルギーのしきい値を決定した。

また、M/C (D/G) 試験についても、「4.1 電気盤の選定」の記載の通り、電気盤内の空間容積や密閉性において、M/C (D/G) 試験と先行 M/C 試験で明確な差はなくアークメカニズムも同様であることから、先行 M/C 試験と同様に解析による評価は用いず、HEAF 試験の結果により評価しアークエネルギーのしきい値を決定した。

6. HEAFに係る対策の判断基準

(審査ガイド抜粋【4. HEAFに係る対策の判断基準】)

実用発電用原子炉施設の保安電源設備のうち、重要安全施設への電力供給に係る電気盤及び当該電気盤に影響を与えるおそれのある電気盤（例えば、2.5m以内にあるもの（解説-6））の遮断器の遮断時間が、3.3又は3.4において評価したしきい値に対応するアーク放電の継続時間と比べ、小さい値となっていることを確認する。ただし、短絡等が起きたとしても非常に短時間（例えば、0.1秒以下）で電気盤への電力供給を止めることができる場合（例えば、受電側に短絡継電器が設置されている等）や、火災の発生に至らないと判断された場合は、適切に遮断されていると判断してもよい。（解説-4）

また、その際に、当該電気盤内の遮断器だけでなく、当該電気盤の受電側の遮断器についても、同様にその他必要な対策（参考-2）を含め、確認する。

(解説-6) 電気盤に影響を与えるおそれのある範囲について

米国においては、火災防護の要求として、ケーブル処理室でのケーブルトレイの水平距離を0.9m以上離すとしている。また、平成23年の東北地方太平洋沖地震の際に女川原子力発電所において発生したアーク火災において、水平距離2.5mより離れた電気盤にはHEAFの影響が及んでいなかったことを踏まえ、影響を与えるおそれのある範囲の目安として、2.5m以内にあるものとした。ただし、実験等によりアーク火災の影響範囲が特定できる場合は、その結果を考慮する必要がある。

(解説-4) 火災の発生に至らないと判断された場合について

HEAF試験の結果、アーク火災の発生に至らない場合がある（例えば、小型の電気盤などにおいて内部の構成部品が吹き飛び、通電できなくなることでアークエネルギーが比較的小さい値になる等）。この様な場合には、しきい値が存在しないことから、その算定は不要とする。

(参考-2) 火災感知設備及び消火設備

火災防護審査基準は、

- ・火災感知設備について、取付面高さ、温度、湿度、空気流等の環境条件や予想される火災の性質を考慮して型式を選定し、早期に火災を感知できる場所に設置すること
- ・消火設備について、火災の火炎、熱による直接的な影響のみならず、煙、流出流体、断線、爆発等による二次的影響が安全機能を有する構築物、系統及び機器に悪影響を及ぼさないように設置すること

を求めている。火災感知設備及び消火設備については、HEAFが発生した場合を配慮して配置されていることを確認する必要がある。

(1) 遮断器の遮断時間の設定

実用発電用原子炉施設の保安電源設備のうち、重要安全施設への電力供給に係る電気盤及び当該電気盤に影響を与えるおそれのある電気盤に発生するアークエネルギーが、「5.3 アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値に係る評価」にて評価したアークエネルギーのしきい値以下となるよう、遮断器の遮断時間を設定する。

電気盤に発生するアークエネルギーは、電気盤に発生する三相短絡電流及び HEAF 試験の結果から得られたアーク電圧の積により算出したアークパワーを遮断器の遮断時間で積分した値としており、以下の式にて算出した。

$$\begin{aligned} E_{3\phi} &= V_{\text{arc}} \times I_{\text{arc}} \times t_{\text{arc}} \\ &= 0.9 \times V_{\text{arc}} \times I_{\text{rms}} \times t_{\text{arc}} \end{aligned}$$

$E_{3\phi}$: 三相のアークエネルギー

V_{arc} : HEAF 試験の結果から得られたアーク電圧

I_{arc} : 三相短絡電流の平均値

I_{rms} : 三相短絡電流の実効値

t_{arc} : アーク発生時の遮断器の遮断時間

a. HEAF 試験の結果から得られたアーク電圧について

アークエネルギーの算出時に使用するアーク電圧は、HEAF 試験の結果から表 6-2 に示すアーク電圧を用いた。

b. 各電気盤に発生する三相短絡電流について

アークエネルギーの算出時に使用する三相短絡電流は、実機で発生する三相短絡電流値に近い値を算出するため、電源から短絡箇所までの電路インピーダンス %Z (変圧器含む) を用いて、以下の式にて算出した。なお、%Z には保守性を考慮し、ケーブル、発電機は含まない。

$$\text{短絡電流 (A)} = \frac{\text{基準容量 (VA)}}{\sqrt{3} \times \text{基準電圧 (V)}} \times \frac{100}{\%Z}$$

c. アーク放電の遮断時間について

アークエネルギーの算出時に使用するアーク放電の遮断時間は、保護継電器及び補助リレーの動作時間並びに遮断器の開放時間等を積み上げた値を設定し、更に保護継電器等の誤差を考慮したアーク放電遮断時間までに発生するアークエネルギーがアークエネルギーのしきい値以下となるよう設計している。（図 6-1 参照）

なお、設計及び工事計画認可申請書に記載しているアーク放電の遮断時間については、表 6-3 に示すとおり誤差を考慮しない遮断器の遮断時間を記している。

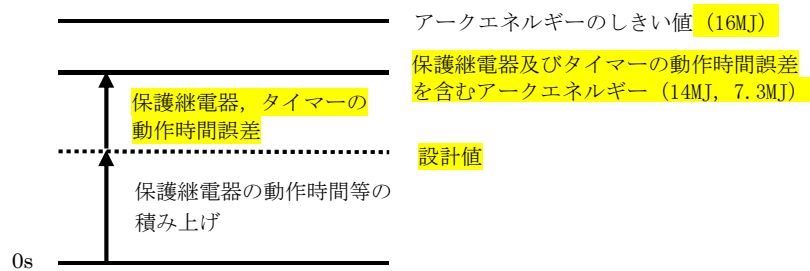


図 6-1 アーク放電の遮断時間の考え方

また、M/C(D/G)については、当該遮断器と D/G の間に遮断器がないことから、HEAF 発生時には D/G を停止することにより D/G からの給電がアークエネルギーのしきい値以下となるよう設計している。

D/G の短絡電流(発電機停止による電流減衰過程含む)は、文献[1]に基づく一般的な以下の①及びメーカ知見に基づく以下の②の算出式を用いて計算した。ただし、過渡段階以降の同期インピーダンスにより算出される短絡電流（以下、「持続短絡電流」という。）を求める際の励磁特性に関する係数については、実際の D/G に即したメーカ知見による係数を採用している。

この式に用いた定数は表 6-1 のとおり。計算結果を表 6-3 及び図 6-6 に示す。

①の算出式は、消磁コンタクタが投入されるより前の短絡電流の計算式であり、消磁コンタクタの投入により消磁された後は、②の式のとおり短絡回路の時定数によって電流が減衰する。

① 消磁前（持続短絡電流がある場合）の三相突発短絡電流

$$I_{rms1} = \sqrt{I_{ac1}^2 + I_{dc1}^2}$$

$$I_{ac1} = I_d + (I_d' - I_d)e^{-\frac{t}{T_d'}} + (I_d'' - I_d')e^{-\frac{t}{T_d''}}$$

$$I_{dc1} = -\sqrt{2}I'' \cos \alpha \times e^{-\frac{t}{T_{dc}}}$$

② 消磁後（持続短絡電流がない場合）の三相突発短絡電流

$$I_{rms2} = \sqrt{I_{ac2}^2 + I_{dc2}^2}$$

$$I_{ac2} = \left(I_d + (I_d' - I_d)e^{-\frac{t}{T_d'}} + (I_d'' - I_d')e^{-\frac{t}{T_d''}} \right) e^{-\frac{T_{41}}{T_d'}}$$

$$I_{dc2} = \left(-\sqrt{2}I'' \cos \alpha \times e^{-\frac{t}{T_{dc}}} \right) e^{-\frac{T_{41}}{T_d'}}$$

T_{41} は消磁コンタクタ投入後の減衰時間

[1]参考文献：新田目 倅造『電力系統技術計算の応用』（1981），P. 84～P. 88

表 6-1 短絡電流算出式定数一覧

記号	定数
I_{rms}	短絡電流の実効値
I_{ac}	短絡電流の交流分の実効値
I_{dc}	短絡電流の直流分
I_d	短絡電流持続電流
I_d'	短絡電流交流分の過渡電流
I_d''	短絡電流交流分の初期過渡電流
T_d'	短絡電流の過渡時定数
T_d''	短絡電流の初期過渡時定数
T_{dc}	短絡電流直流分の時定数
α	短絡瞬時の電圧の位相角

アーク放電の遮断時間に含まれる誤差の考え方を図 6-2 に示し、考慮した誤差について表 6-2 に示す。

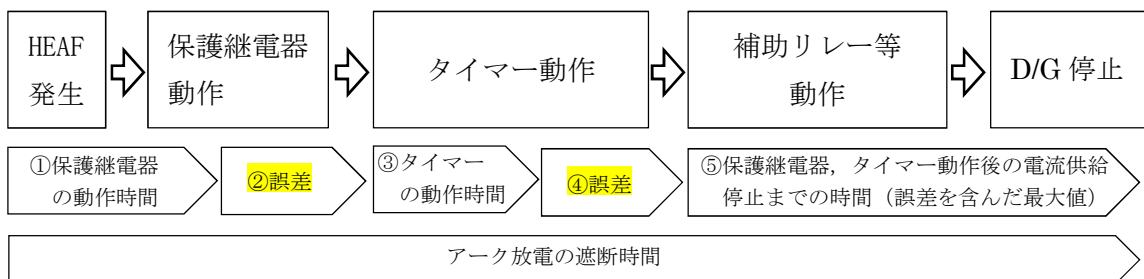


図 6-2 遮断器の遮断時間に含まれる誤差の考え方 (1/2)

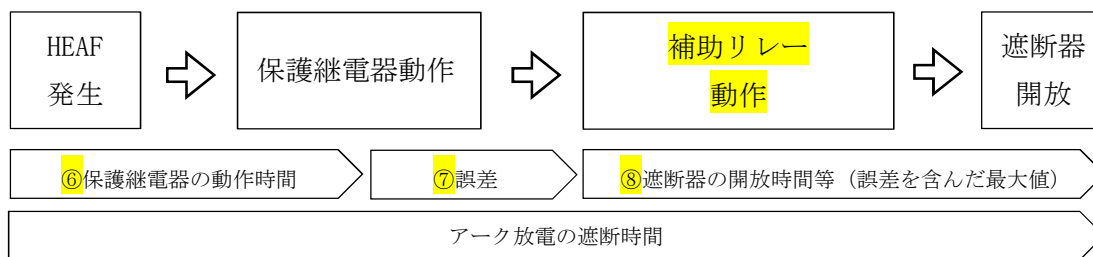


図 6-2 遮断器の遮断時間に含まれる誤差の考え方 (2/2)

図 6-2 に示す時間の考え方については以下のとおり。

- ①保護継電器の動作時間
(HEAF 発生から保護継電器が過電流を検知し、信号を発するまでの時間)
- ②誤差 (保護継電器の動作時間に対する誤差)
- ③タイマーの動作時間
(保護継電器から信号を受けて、タイマーが信号を発するまでの時間)
- ④誤差 (タイマーの動作時間に対する誤差)
- ⑤保護継電器、タイマー動作後の電流供給停止までの時間 (誤差を含んだ最大値)
- ⑥保護継電器の動作時間
(HEAF 発生から保護継電器が過電流を検知し、信号を発するまでの時間)
- ⑦誤差 (保護継電器の動作時間に対する誤差)
- ⑧継電器動作後の電流供給停止までの時間 (誤差を含んだ最大値)

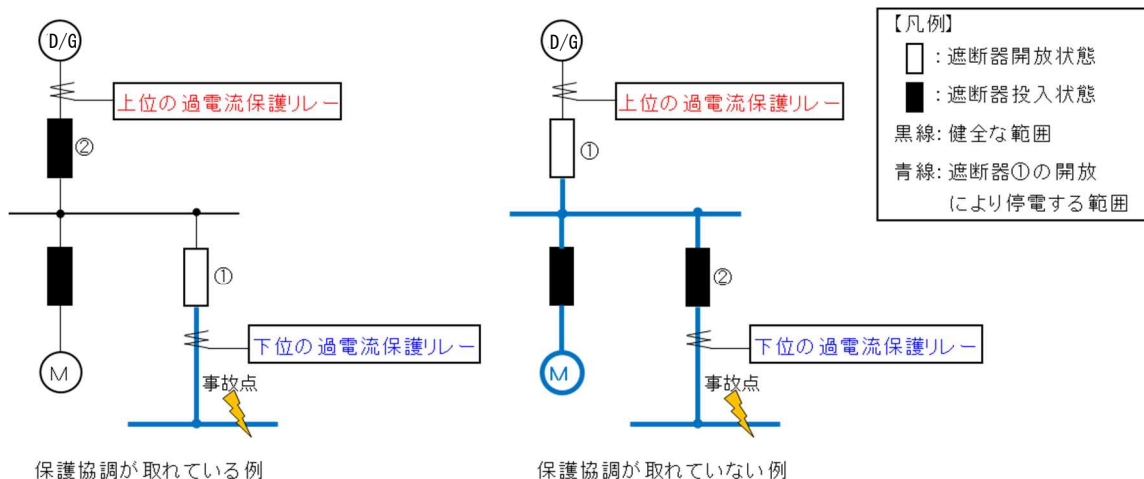
表 6-2 アーク放電の遮断時間に関する誤差

誤差 パターン	使用する保護継電器		誤差	備考
	機種	保護要素		
1	製品 A	51 (過電流継電器)	+7%	
2	製品 B	51 (過電流継電器)	+7%	
3	製品 C	51 (過電流継電器)	+7%	
4	製品 D	タイマー	<input type="text"/> (sec)	

各電気盤のアーク放電遮断時間及びアークエネルギーの一覧を表 6-3 に示す。

なお、アーク放電の遮断時間を設定する際に実施する保護継電器の動作時間の設定については、上流及び下流の保護継電器の動作時間と協調を図ることで、電気事故による影響範囲を局所化する設計とする。

具体的には、事故点に最も近い過電流保護リレーが上位の過電流保護リレーよりも先に動作する設計とする。



※ 数字は遮断器が開放する順番を示す。
但し、①の遮断器開放により、短絡電流が除去された場合、②の遮断器は開放しない。

図 6-3 保護協調のイメージ

D/Gの給電回路に設置されている過電流保護リレーの考え方は、補機側の過電流保護リレーがD/G側の過電流保護リレーよりも先に動作する設定としている。この保護協調が適切でない場合、補機側の電気事故により、D/G受電遮断器が開放してしまい、D/Gからの電源給電が遮断されることとなる。これは事故点への電源給電が遮断されるが、同時に他の健全な補機への電源給電も遮断されるため、本事象は避ける必要がある。

したがって、補機側の短絡事故に対しては、瞬時に動作する50保護リレー及び時限をもって動作する51保護リレーを組合せて適用することで保護協調を実現する。

50保護リレーを追加する場合、既存の補機側50保護リレーの保護協調について留意する必要がある。

そこで、補機側の短絡事故に対しては、瞬時に動作する50保護リレー及び時限をもって動作するD/G側の51保護リレーを組合せて適用することで保護協調を維持し、D/G側の短絡事故に対しては、既存のD/G側の51保護リレーの回路に、更に時限をもって動作させるタイマーを追加し、D/G停止（重故障）とする回路に変更することによりHEAF対策を行うものとする。

なお、タイマーは、既設設計思想に影響を与えないようにするため、51保護リレー動作によりD/G受電遮断器が開放し、短絡電流が除去された場合にはD/Gは停止させず、かつ、HEAF火災に至る前にD/Gの機関停止及び消磁コンタクタ投入が完了するように、時間を設定する必要がある。

タイマー最小設定時間は、51保護リレー動作によりD/G受電遮断器が開放した場合にはタイマーが動作しないようにするため、補助リレー動作時間、D/G受電遮断器開放時間、51保護リレー復帰時間、補助リレー復帰時間を考慮すると、sec以上としなければならない。

タイマー最大設定時間は、HEAF火災しきい値（短絡発生からsec）から51保護リレー、補助リレー、消磁コンタクタの動作時間及び短絡電流減衰時間を除いたsec以下としなければならない。

以上より、追加するタイマーの時間は、secからsecの範囲からsecを選定する。

上記の検討結果より、誤差を考慮した遮断器の遮断時間によるアークエネルギーは表6-3「電気盤のアークエネルギー及び遮断器の遮断時間一覧（5/5）」の通りMJ、MJであり、しきい値である16MJ以下である。

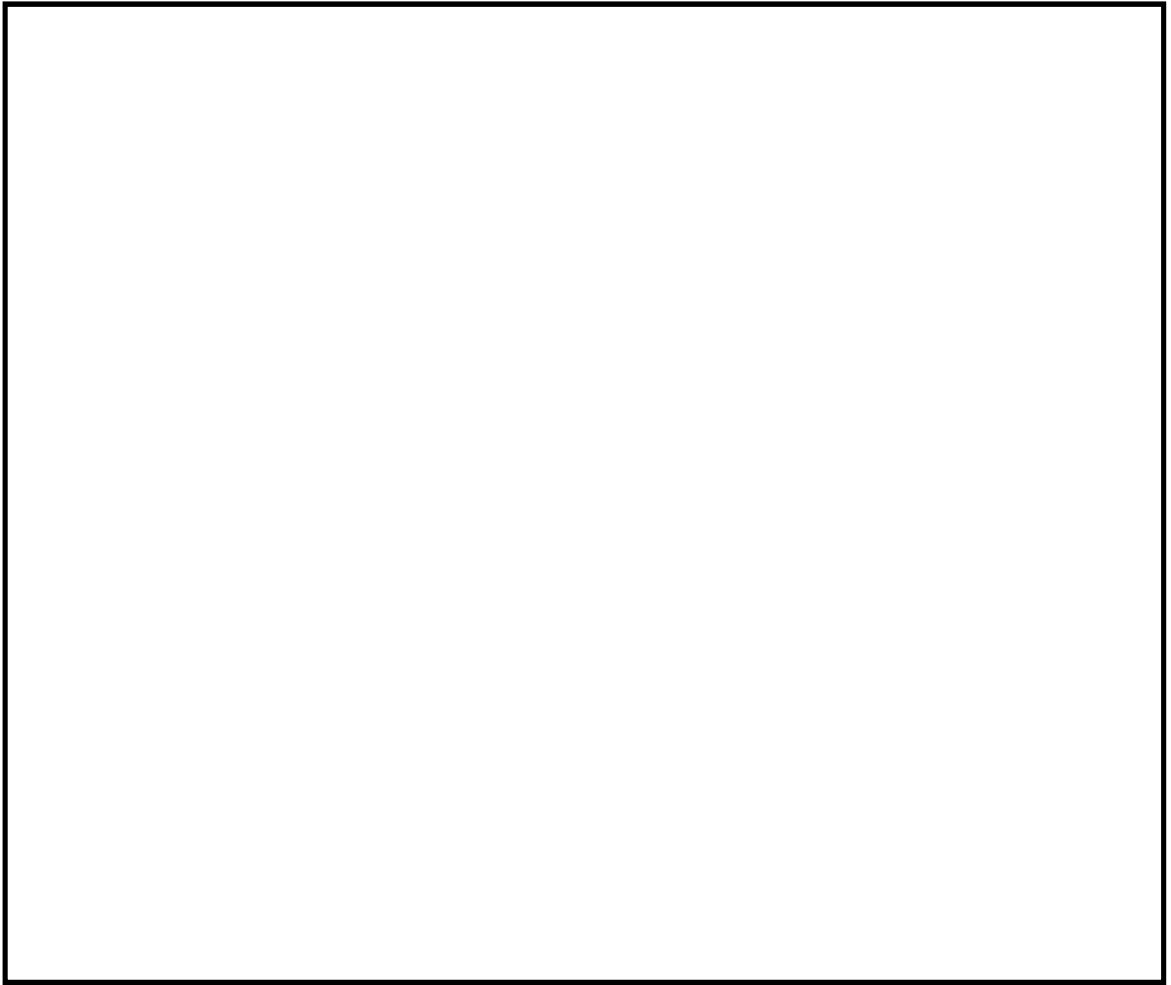


図 6-4 タイマー最小設定時間

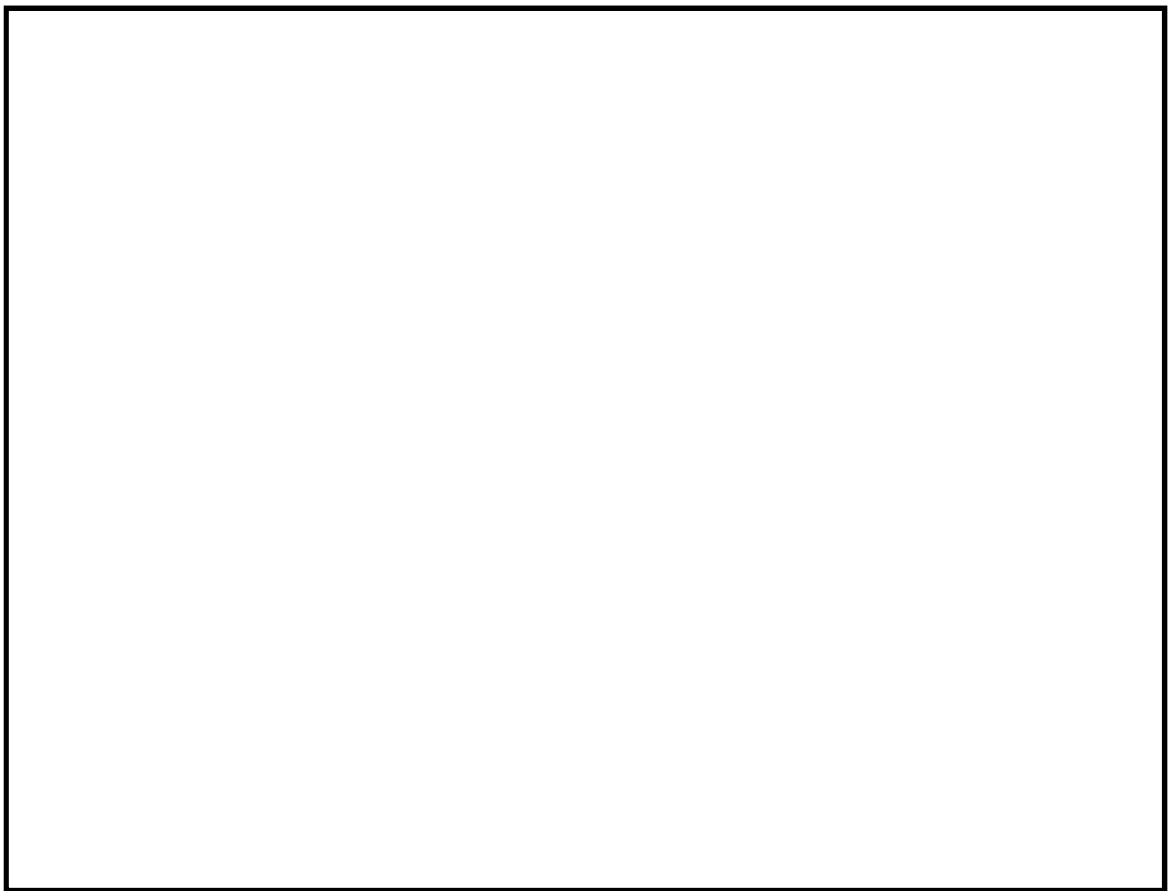


図 6-5 タイマー最大設定時間

また、M/C(D/G)について、表 6-3 に示す遮断時間の考え方は、以下のとおり。

- 51 保護リレーの動作時間は短絡電流の大きさと 51 保護リレーの動作特性より [sec] となる。
- 51 保護リレーの動作時間により、表 6-2 の誤差 (+7%) に該当する [sec] の測定誤差を考慮した結果、51 保護リレーの動作時間を [sec] とした。
- アーク放電を D/G 受電遮断器で遮断する場合の時間は、補助リレーの動作時間と D/G 受電遮断器の仕様（遮断器の開放時間）で決定した。
- 補助リレーの動作時間： [sec]
- D/G 受電遮断器開放時間： [sec]
- アーク放電を D/G の停止により遮断する場合は、D/G の短絡電流の式により遮断時間を算出した。

電気盤のアークエネルギー及びアーク放電の遮断時間について、表 6-3 に示す。

表 6-3 電気盤のアーケエネルギー及び遮断器の遮断時間一覧 (1/5)

アーケ放電発生箇所		アーケ放電を遮断するために開放する遮断器	①保護継電器の動作時間 (sec)	②誤差 (sec)	③遮断器の開放時間等 (sec)	誤差を考慮しない場合*1		誤差を考慮した場合		基準容量 (kVA)	%Z	三相短絡電流 (kA)	アーケ電圧 (kV)	考慮している誤差パターン	
機器名称	遮断器名称					①+③ 遮断時間 (sec)	アーケエネルギー (MJ)	①+②+③ 遮断時間 (sec)	アーケエネルギー (MJ)						
M/C	M/C7C-1B (M/C6SA-1—M/C7C 母線連絡 (M/C7C 側))	M/C6SA-1-5A								1000000	221.9	37.7	1.34	3	
	M/C7C-6A (M/C6SB-2—M/C7C, 7D, 7E 母線連絡 (M/C7C 側))	M/C6SB-2-3B								1000000	221.9	37.7	1.34	3	
	M/C7D-1B (M/C6SB-2—M/C7C, 7D, 7E 母線連絡 (M/C7D 側))	M/C6SB-2-3B								1000000	221.9	37.7	1.34	3	
	M/C7D-6A (M/C6SA-2—M/C7D, 7E 母線連絡 (M/C7D 側))	M/C6SA-2-3B								1000000	221.9	37.7	1.34	3	
	M/C7E-1B (M/C6SA-2—M/C7D, 7E 母線連絡 (M/C7E 側))	M/C6SA-2-3B								1000000	221.9	37.7	1.34	3	
	M/C7E-6A (M/C6SB-2—M/C7C, 7D, 7E 母線連絡 (M/C7E 側))	M/C6SB-2-3B								1000000	221.9	37.7	1.34	3	
	M/C7C 母線に接続される遮断器 (M/C7C-1B, 4B, 6A を除く)	M/C7C-1B									1000000	221.9	37.7	1.34	1
		M/C7C-6A									1000000	221.9	37.7	1.34	1
	M/C7D 母線に接続される遮断器 (M/C7D-1B, 4B, 6A を除く)	M/C7D-1B									1000000	221.9	37.7	1.34	1
		M/C7D-6A									1000000	221.9	37.7	1.34	1
	M/C7E 母線に接続される遮断器 (M/C7E-1B, 3B, 6A を除く)	M/C7E-1B									1000000	221.9	37.7	1.34	1
		M/C7E-6A									1000000	221.9	37.7	1.34	1

表 6-3 電気盤のアーケエネルギー及び遮断器の遮断時間一覧 (2/5)

アーケ放電発生箇所		アーケ放電を遮断するために開放する遮断器	①保護継電器の動作時間 (sec)	②誤差 (sec)	③遮断器の開放時間等 (sec)	誤差を考慮しない場合*1		誤差を考慮した場合		基準容量 (kVA)	%Z	三相短絡電流 (kA)	アーケ電圧 (kV)	考慮している誤差パターン
機器名称	遮断器名称					①+③ 遮断時間 (sec)	アーケエネルギー (MJ)	①+②+③ 遮断時間 (sec)	アーケエネルギー (MJ)					
P/C	P/C7C-1-2B (P/C7C-1 受電遮断器 (動力変圧器二次側))	M/C7C-2A								3330	11.7	34.2	0.467	1
	P/C7C-1 母線に接続される遮断器 (P/C7C-1-2B を除く)	P/C7C-1-2B								3330	11.7	34.2	0.467	2
	P/C7C-2-2B (P/C7C-2 受電遮断器 (動力変圧器二次側))	M/C7C-2B								2000	6.5	37.0	0.467	1
	P/C7C-2 母線に接続される遮断器 (P/C7C-2-2B を除く)	P/C7C-2-2B								2000	6.5	37.0	0.467	2
	P/C7D-1-2B (P/C7D-1 受電遮断器 (動力変圧器二次側))	M/C7D-2A								3330	11.7	34.2	0.467	1
	P/C7D-1 母線に接続される遮断器 (P/C7D-1-2B を除く)	P/C7D-1-2B								3330	11.7	34.2	0.467	2
	P/C7D-2-2B (P/C7D-2 受電遮断器 (動力変圧器二次側))	M/C7D-2B								2000	6.5	37.0	0.467	1
	P/C7D-2 母線に接続される遮断器 (P/C7D-2-2B を除く)	P/C7D-2-2B								2000	6.5	37.0	0.467	2
	P/C7E-1-2B (P/C7E-1 受電遮断器 (動力変圧器二次側))	M/C7E-2A								2000	6.5	37.0	0.467	1
	P/C7E-1 母線に接続される遮断器 (P/C7E-1-2B を除く)	P/C7E-1-2B								2000	6.5	37.0	0.467	2
	P/C7E-2-2B (P/C7E-2 受電遮断器 (動力変圧器二次側))	M/C7E-2B								2000	6.5	37.0	0.467	1
	P/C7E-2 母線に接続される遮断器 (P/C7E-2-2B を除く)	P/C7E-2-2B								2000	6.5	37.0	0.467	2

表 6-3 電気盤のアーケエネルギー及び遮断器の遮断時間一覧 (3/5)

アーケ放電発生箇所		アーケ放電を遮断するために 開放する遮断器	①保護継電器の動作時間 (sec)	②誤差 (sec)	③遮断器の開放時間等 (sec)	誤差を考慮しない場合*1		誤差を考慮した場合		基準容量 (kVA)	%Z	三相短絡電流 (kA)	アーケ電圧 (kV)	考慮している 誤差パターン
機器 名称	遮断器名称					①+③ 遮断時間 (sec)	アーケエネルギー (MJ)	①+②+③ 遮断時間 (sec)	アーケエネルギー (MJ)					
MCC	MCC7C-1-1 母線に接続される遮断器 (P/C7C-1-3A を除く)	P/C7C-1-3A								3330	11.7	34.2	0.675	2
	MCC7C-1-2 母線に接続される遮断器 (P/C7C-1-4A を除く)	P/C7C-1-4A								3330	11.7	34.2	0.675	2
	MCC7C-1-3 母線に接続される遮断器 (P/C7C-1-3B を除く)	P/C7C-1-3B								3330	11.7	34.2	0.675	2
	MCC7C-1-4 母線に接続される遮断器 (P/C7C-1-4B を除く)	P/C7C-1-4B								3330	11.7	34.2	0.675	2
	MCC7C-1-6 母線に接続される遮断器 (P/C7C-1-5A を除く)	P/C7C-1-5A								3330	11.7	34.2	0.675	2
	MCC7C-1-7 母線に接続される遮断器 (P/C7C-1-5B を除く)	P/C7C-1-5B								3330	11.7	34.2	0.675	2
	MCC7C-2-1 母線に接続される遮断器 (P/C7C-2-3A を除く)	P/C7C-2-3A								2000	6.5	37.0	0.675	2
	MCC7D-1-1 母線に接続される遮断器 (P/C7D-1-3A を除く)	P/C7D-1-3A								3330	11.7	34.2	0.675	2
	MCC7D-1-2 母線に接続される遮断器 (P/C7D-1-4A を除く)	P/C7D-1-4A								3330	11.7	34.2	0.675	2

表 6-3 電気盤のアーケエネルギー及び遮断器の遮断時間一覧 (4/5)

アーケ放電発生箇所		アーケ放電を遮断するために 開放する遮断器	①保護継電器の動作時間 (sec)	②誤差 (sec)	③遮断器の開放時間等 (sec)	誤差を考慮しない場合*1		誤差を考慮した場合		基準容量 (kVA)	%Z	三相短絡電流 (kA)	アーケ電圧 (kV)	考慮している 誤差パターン
機器 名称	遮断器名称					①+③ 遮断時間 (sec)	アーケエネルギー (MJ)	①+②+③ 遮断時間 (sec)	アーケエネルギー (MJ)					
MCC	MCC7D-1-3 母線に接続される遮断器 (P/C7D-1-3Bを除く)	P/C7D-1-3B								3330	11.7	34.2	0.675	2
	MCC7D-1-4 母線に接続される遮断器 (P/C7D-1-4Bを除く)	P/C7D-1-4B								3330	11.7	34.2	0.675	2
	MCC7D-1-6 母線に接続される遮断器 (P/C7D-1-5Aを除く)	P/C7D-1-5A								3330	11.7	34.2	0.675	2
	MCC7D-1-7 母線に接続される遮断器 (P/C7D-1-5Bを除く)	P/C7D-1-5B								3330	11.7	34.2	0.675	2
	MCC7D-2-1 母線に接続される遮断器 (P/C7D-2-3Aを除く)	P/C7D-2-3A								2000	6.5	37.0	0.675	2
	MCC7E-1-1A, 1B 母線に接続される遮断器 (P/C7E-1-3Aを除く)	P/C7E-1-3A								2000	6.5	37.0	0.675	2
	MCC7E-1-2 母線に接続される遮断器 (P/C7E-1-3Bを除く)	P/C7E-1-3B								2000	6.5	37.0	0.675	2
	MCC7E-1-3 母線に接続される遮断器 (P/C7E-1-3Cを除く)	P/C7E-1-3C								2000	6.5	37.0	0.675	2
	MCC7E-2-1 母線に接続される遮断器 (P/C7E-2-4Aを除く)	P/C7E-2-4A								2000	6.5	37.0	0.675	2

表 6-3 電気盤のアーケエネルギー及び遮断器の遮断時間一覧 (5/5)

アーケ放電発生箇所		アーケ放電を 遮断するために 開放する遮断器	①保護継電器 の動作時間 (sec)	②誤差 (sec)	③タイマーの 動作時間 (sec)	④タイマーの 誤差 (sec)	誤差 を考慮しない場合			誤差を考慮した場合			三相短絡電流 (kA)	アーケ電圧 (kV)	考慮している 誤差パターン
機器 名称	遮断器名称						⑤継電器動作後の電流 供給停止までの時間 (sec)	①+③+⑤ 遮断時間 (sec) *1	アーケ エネルギー (MJ) *1	⑤' 保護継電器動作後 の電流供給停止まで の時間 (sec)	①+②+③+④+⑤' 遮断時間 (sec)	アーケ エネルギー (MJ)			
M/C (D/G)	M/C7C-4B (D/G7A 受電遮断器)	D/G7A 停止										2.99	1.33	1, 4	
	M/C7C 母線に接続される 遮断器 (M/C7C-4B を除く)	M/C7C-4B										2.99	1.33	1	
	M/C7D-4B (D/G7B 受電遮断器)	D/G7B 停止										2.99	1.33	1, 4	
	M/C7D 母線に接続される 遮断器 (M/C7D-4B を除く)	M/C7D-4B										2.99	1.33	1	
	M/C7E-3B (D/G7C 受電遮断器)	D/G7C 停止										2.99	1.33	1, 4	
	M/C7E 母線に接続される 遮断器 (M/C7E-3B を除く)	M/C7E-3B										2.99	1.33	1	

*1 : 工認申請には, 本内容を記載

*2 : D/G 受電遮断器が開放するまでの時間

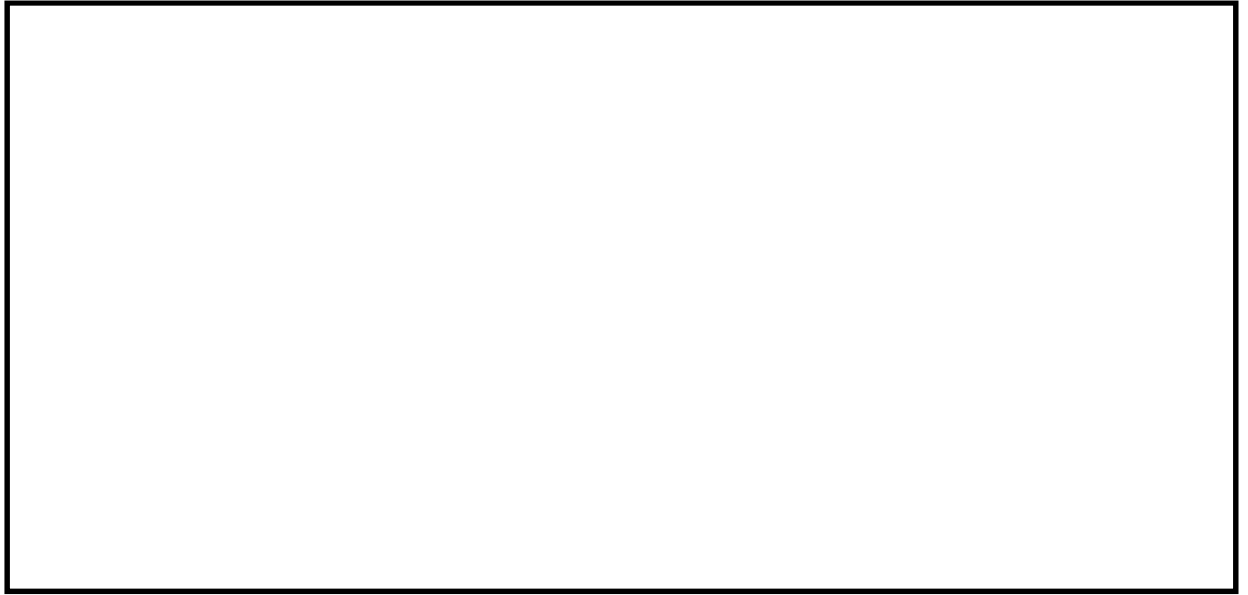


図 6-6 短絡電流の減衰（柏崎刈羽原子力発電所第 7 号機）

d. D/G 停止のための保護継電器追加における回路構成について

D/G 受電遮断器でアーク放電が発生した場合、HEAF 発生に起因した短絡電流を早期に検出し D/G を停止するため、既存の過電流継電器（以下「51 保護リレー」という。）を重故障扱いとするインターロックに変更する。今回のインターロック追加ロジック、回路構成の概略を図 6-7 に示す。

また、アークエネルギー抑制の観点から、D/G 機関の停止後速やかに HEAF 発生点である D/G 受電遮断器への電流供給を停止する必要があることから、51 保護リレー動作で D/G の消磁コンタクタを投入する。

なお、追加するインターロック回路は既存の D/G 制御盤内に追加し、耐震、溢水影響等については既評価から変更が無いよう設計する。

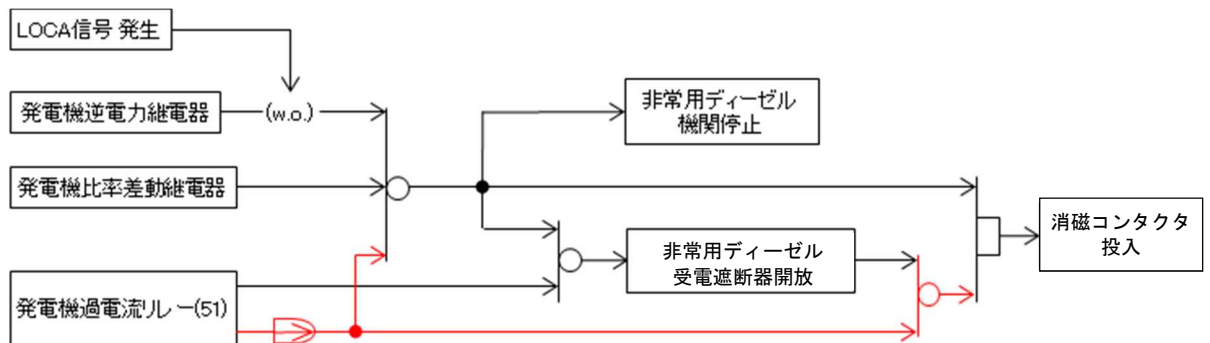


図 6-7 インターロック図（概要）

(2) 火災感知設備及び消火設備の配置

a. HEAF による火災影響の範囲

火災感知設備及び消火設備（以下「火災感知設備等」という。）について、HEAF による火災影響の範囲（Zone of Influence. 以下「ZOI」という。）を HEAF 試験により確認した。

(a) HEAF 試験による評価対象設備の選定

HEAF 試験にあたって、図 6-8 に示すフローを用いて HEAF による火災の影響評価が必要な設備（以下「評価対象設備」という。）の選定を行った。評価対象設備を抽出した結果、感知器が評価対象設備として選定された。（表 6-4、図 6-9 参照）

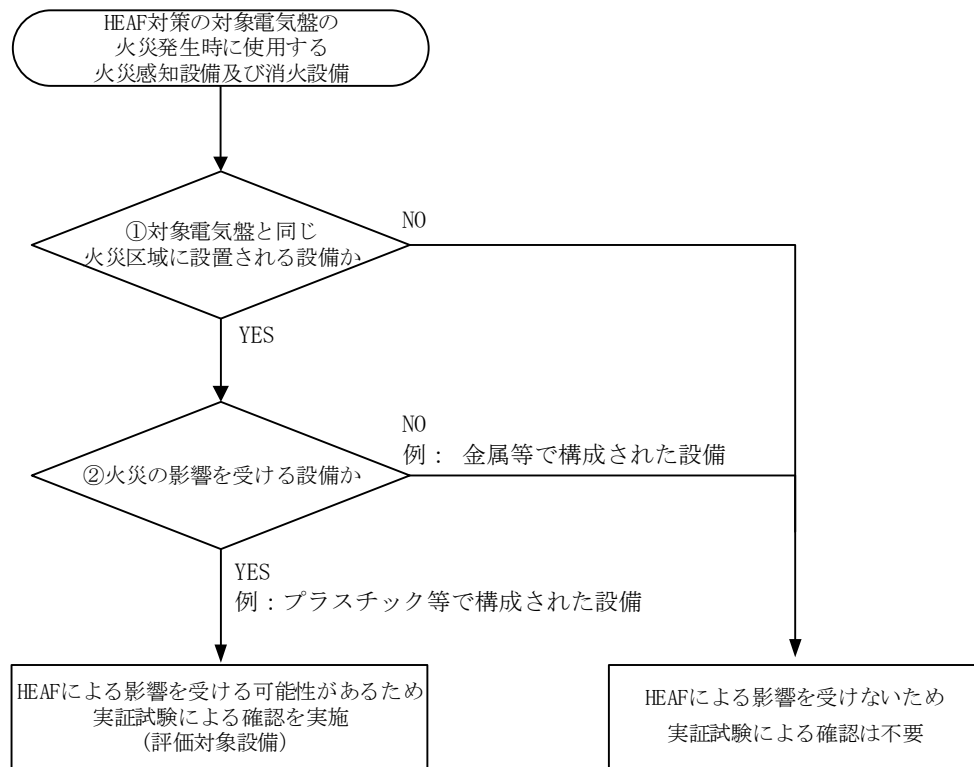


図 6-8 評価対象設備の選定フロー

表 6-4 評価対象設備の選定結果

HEAF 対策の対象電気盤の 火災発生時に使用する 火災感知設備及び消火設備		①対象電気盤と同じ 火災区域に設置 される設備か 〔 ○ : YES × : NO 〕	②火災の影響を受 ける設備か 〔 ○ : YES × : NO 〕	評価対象 設備 〔 ○ : 対象 × : 対象外 〕
火災感知 設備	感知器	○	○	○
消火設備	全域ガス自動消 火設備制御盤	×	—	×
	ガスボンベ	○	× (金属のみで構成)	×
	噴射ヘッド	○	× (金属のみで構成)	×

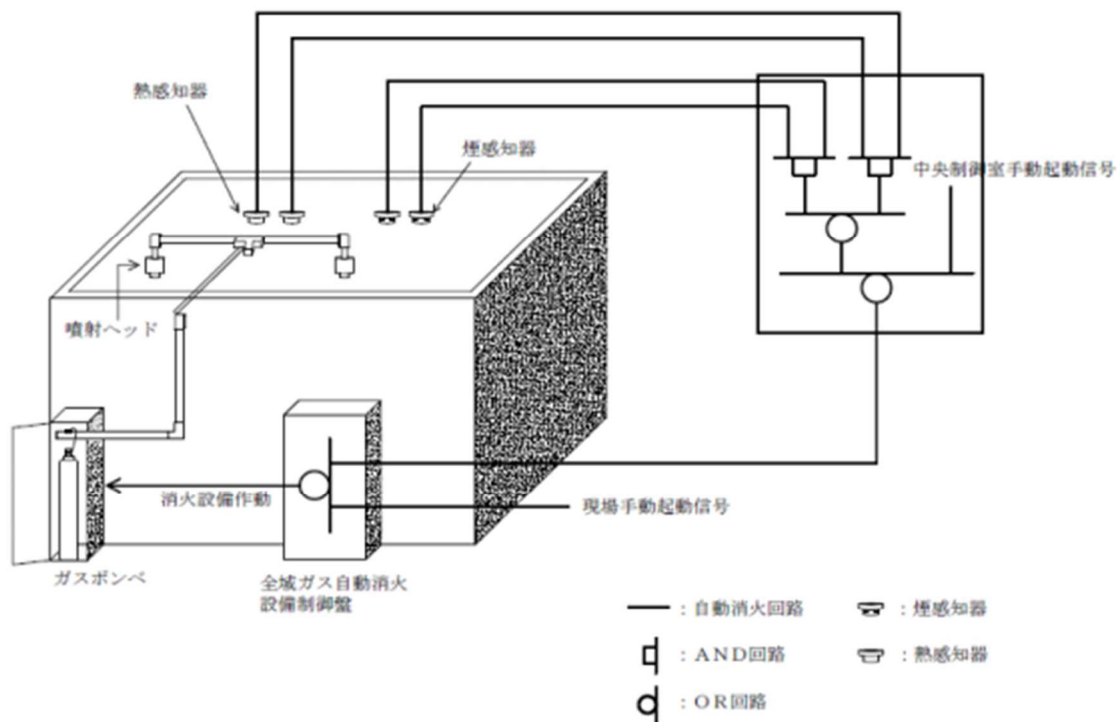


図 6-9 火災感知設備及び消火設備のシステム構成概要図

(b) 評価方法

NUREG/CR-6850 (火災 PRA 評価手法)・付属書 M (以下「NUREG」という。)において、HEAF による ZOI は、電気盤の上方 1.5m としていることから、HEAF 試験においては、電気盤の上方 1.5m に火災感知器を設置し、HEAF 発生後に機能喪失しないことを確認する。なお、NUREG においては、水平方向の ZOI は 0.9m と規定されているが、感知器は電気盤の水平方向に設置されないことから、鉛直方向のみの ZOI の確認を行った。

(c) 評価結果

HEAF 試験において、M/C、P/C、MCC 及び M/C(D/G) とともに、HEAF 発生後も火災感知器の機能喪失はなかった。このため、NUREG で示された ZOI (鉛直方向) を適用する。

b. 火災感知設備等の配置の確認

HEAF 発生防止対策を実施する電気盤は、火災防護審査基準に基づき、火災防護対策を実施する機器として選定し、火災区域を設定して火災防護対策を実施している。

HEAF 発生防止対策を実施する電気盤の火災感知設備及び消火設備について、「審査ガイド」に基づき、HEAF が発生した場合を配慮して配置されていることを確認する。

なお、火災が発生した場合の影響を考慮しても、多重化されたそれぞれの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としている。

「a. HEAF による火災影響の範囲」の評価結果に基づき、火災感知器が NUREG に示された図 6-10 の ZOI の範囲内に設置されていないことを確認する。

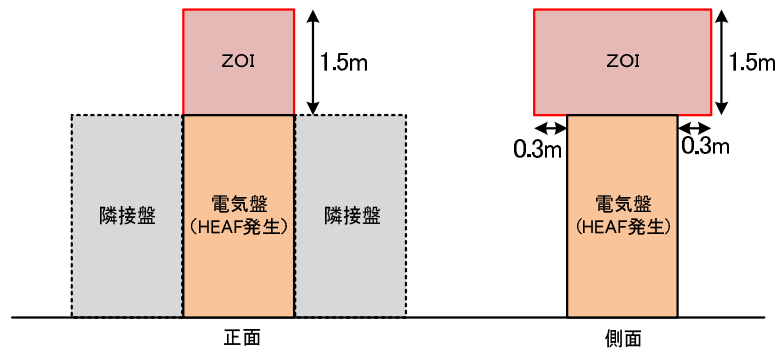


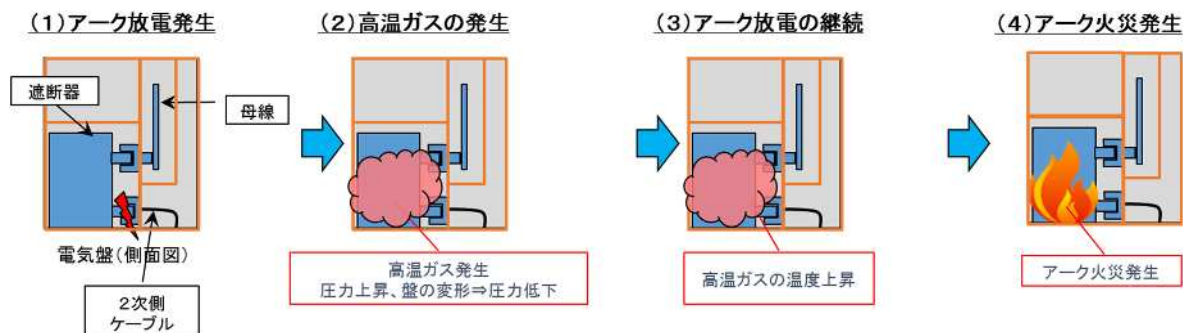
図 6-10 火災感知器に対する HEAF の ZOI

c. 確認結果

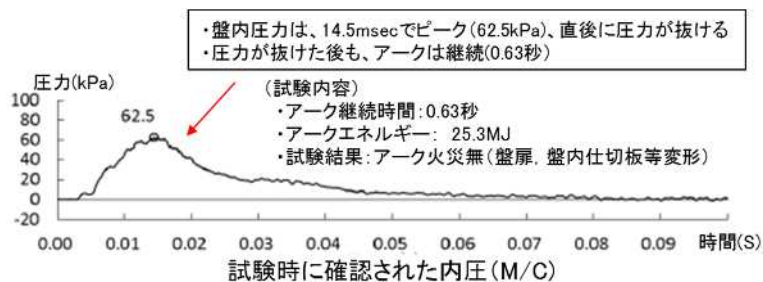
確認の結果、HEAF 対策の対象電気盤の ZOI 範囲内に火災感知器はないことから、火災感知設備等は、HEAF を配慮して配置されている。確認の結果について、添付資料 2 に示す。

同等性に影響を与えるおそれのあるパラメータの整理に関する補足について

1. アーク火災発生のメカニズムについて



- (1) 電気盤遮断器室内の遮断器の1次側（又は2次側）に銅線で三相短絡し、短絡電流を流すことによりアーク放電を発生させると、金属ヒュームを含んだ高温ガスが発生する。この高温ガスによる爆発現象は、音速で伝播することから、0.01秒で約3m伝播する（音速 $340\text{m/s} \times 0.01\text{秒} \approx 3.4\text{m}$ ）。
- (2) 電気盤の寸法は、高さ約3m×幅約1m×奥行き約3mであることから、以下のグラフのとおり、0.01秒～0.02秒後に圧力上昇はピークとなり、その後電気盤の開口部や盤内仕切板の変形（M/C（D/G）試験ではアークパワーが小さいことから仕切板の変形には至らない）により高温ガスは電気盤外に抜け、盤内圧力は減少傾向になる。なお、密閉容器であれば、圧力が上昇すれば温度も上昇するが、電気盤は密閉構造ではなく開口部を有する構造であることから、圧力の上昇に伴い盤内の温度が上昇するものではない。



盤内仕切板の状態
(母線室—遮断器室間)

(3, 4) 短時間で大部分の高温ガスは電気盤外に放出されるが、一部はアーク放電の発生箇所である遮断器近傍に滞留することから、高温ガスから可燃物にエネルギーが伝播し、あるしきい値以上のエネルギーが印加されるとアーク火災となる。試験体系上、アークを発生させた銅線をワイヤリングした箇所である遮断器近傍に最も高温ガスが滞留しやすいことから、遮断器室内の可燃物が主要な燃焼物であり、試験の結果とも一致している。



遮断器室アーク発生、アーク火災有、消火後の遮断器の様子

2. M/C (D/G) 試験と先行 M/C 試験との圧力上昇の相違点について

第3回新規要件に関する事業者意見の聴取に係る会合（2018年10月15日開催）「資料3-2 高エネルギーアーク損傷（HEAF）に伴う火災対策に係る事業者の取り組み状況について」5頁（別添1参照）に試験体選定時の考え方を記載しており、HEAF発生時の圧力上昇は、盤の変形や開口部から圧力が抜けるため HEAF 発生直後の盤内温度上昇に盤内容積の大小は直接寄与しない旨説明している。

事業者意見の聴取に係る会合では、試験時に確認された電気盤の内圧は先行 M/C 試験を代表として記載しているが、HEAF 発生直後の最大圧力値は約 62.5kPa（火災が発生しない最大アークエネルギー）であった。それに比べて、M/C (D/G) 試験は約 2.98kPa（火災が発生しない最大アークエネルギー）であった（別添2参照）。

先行 M/C 試験と同様にアーク火災を防止するためにはアーク火災となるアークエネルギー（しきい値）以内に抑える設計とすることについて、前述の M/C (D/G) 試験、先行 M/C 試験の HEAF 発生直後の最大圧力の違いを踏まえてもアーク火災発生メカニズムとして同等であることについて補足説明する。

(1) M/C (D/G) 試験と先行 M/C 試験で用いた試験体、試験条件等の相違点

M/C (D/G) 試験と先行 M/C 試験で用いた試験体、試験条件等について纏めた結果は表1のとおりである（詳細は別添3参照）。

試験条件のうち試験電流については、M/C (D/G) 試験は先行 M/C 試験の 1/4 程度の試験電流値である。それ以外（試験体、計測方法等）については明確な差はなく同等である。

表1 M/C (D/G) 試験 - 先行M/C試験の比較について

	M/C (D/G) 試験	先行M/C試験	比較・評価
試験体	規格： JEM-1425, JEC-2300 に基づき製造 開口面積：約 0.48m ²	規格： JEM-1425, JEC-2300 に 基づき製造 開口面積：約 0.07m ²	同一の規格で製造されており 形状、盤容積（遮断器室）、絶 縁物の種別、開口部の大きさ などに明確な差はない
試験 条件	試験電圧：6.9kV 試験電流：5.0kA	試験電圧： 6.9～8.0kV 試験電流： 18.9～40.0kA	試験電圧は同等であるが試験 電流についてはM/C(D/G)試験 はD/G給電時の3相短絡電流 を模擬しておりM/C試験時の 約13～25%程度の大きさ
計測 方法	圧力センサ（共和電 業製・ひずみゲージ 式・200kPa)	同左	センサ・測定箇所、測定方法 ともに同等である。

(2) 試験電流値の差による影響について

アークエネルギーはアークパワーとアーク時間の積分値であるがアーク時間は可変パラメータであることから、HEAF発生直後の現象の違いはアークパワー（アーク電圧とアーク電流の積）の差として現れる。

図1にHEAF試験で得られた全てのM/Cの最大アークパワー（アーク電圧とアーク電流の積）と圧力上昇最大値の関係を示すと概ね比例関係にあることがわかる。M/C(D/G)試験における、最大アークパワーは14.4～17.2MWであり、先行M/C試験時における値（非耐震：33.6～68.3MW、耐震：84.9～156.9MW）と比べて小さい理由は、前述のとおり試験条件における電流値が小さいからである（M/C(D/G)5kA、M/C(D/G)以外の非耐震：18.9kA、耐震：40kA）。

このことから、電気盤内の圧力上昇の現象としては、M/C(D/G)試験及び先行M/C試験の試験電流値の差によるものでありピーク圧力に違いはあるものの同様の波形形状を示しており試験状況からも開口部から高温ガスが電気盤外に抜けていることは明らかであることから圧力上昇の現象としては同様であると考えられる。（開放系アーク放電と試験データの比較については別紙1参照）

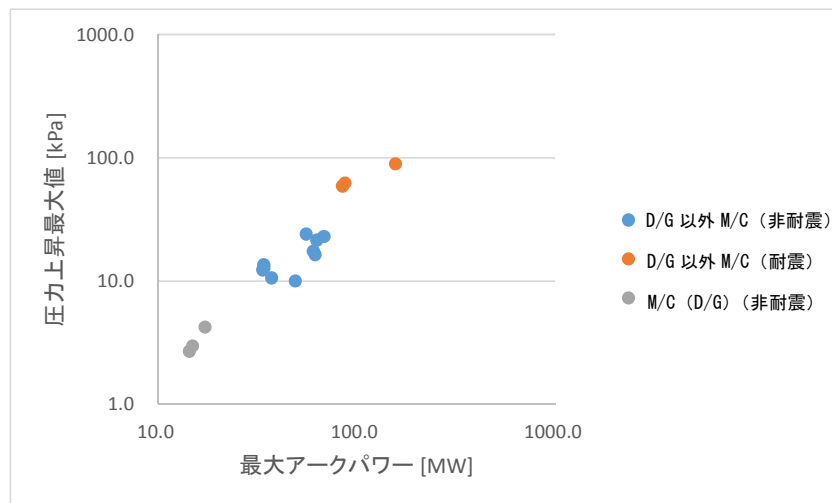


図1 最大アークパワーと圧力上昇最大値の関係

(3) まとめ

今回の HEAF 試験では、図1 のとおりアークパワーと圧力上昇値は比例関係にあることから、HEAF 発生直後の圧力上昇という現象は、外部電源受電時と D/G 給電時に違いはなく同様のメカニズムであると考えることができる。

よって、アーク火災発生のメカニズムである以下の①及び②について、D/G 給電時においても①については本考察のとおり外部電源受電時と同等のメカニズムであると考えることができる。

- ① HEAF 発生直後の短時間で大部分の高温ガスは電気盤外に放出される
- ② 一部の高温ガスは、アーク放電の発生箇所である遮断器近傍に滞留することから、高温ガスから可燃物にエネルギーが伝播し、あるしきい値以上のエネルギーが印加されるとアーク火災となる。

また、②については第3回新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合（2018年10月15日開催）「資料3-2 高エネルギーアーク損傷（HEAF）に伴う火災対策に係る事業者の取り組み状況について」補10頁（添付1参照）に記載のとおり M/C についてはアークエネルギーが約 25MJ 以上となれば火災となり、アーク継続時間とアークエネルギーは基準電流 25kA で換算すると外部電源受電時、D/G 給電時に違いはなく概ね比例関係にあることから同等のメカニズムと考えることができる。

以上

開放系アーク放電と試験データの比較について

開放系アーク放電に関する Babrauskas 博士の論文^[1]によると図 1-1 のとおりアークパワー（横軸）は、発生圧力×離隔距離（アーク発生箇所と圧力測定箇所との間の距離）の積（縦軸）で整理できる。今回の電気盤寸法は、高さ 2.3m×幅 1m×奥行き 2.5mであり、電気盤の正面で測定した圧力が最大値を示したため離隔距離を 0.5m とした。試験時の条件を下表に整理し図 1-1 黄色プロットで示すと概ね Baker's theory と示された赤線付近にあることから開放系の論文データと符合する。これより、アーク発生時の電気盤内圧力は、開放系のアークパワーと離隔距離の物理指標で整理できる。

また、試験状況ビデオからも高温ガスが開口部等から抜けることは明らかである。このことから M/C (D/G) 試験と先行 M/C 試験で使用した電気盤は盤内仕切り板変形や開口部を有する構造であることから、境界条件が開放系に近い同等の電気盤として扱うことができると推察する。

表 1-1 アーク発生時の電気盤内圧力に関連する物理量

物理量	M/C (D/G) 試験時	先行 M/C 試験時
アークパワー (横軸)	$2\pi fVI$ $=2*\pi*100\text{Hz}*1.33\text{kV}*5\text{kA}$ $\doteq 4*10^9$ (9 乗オーダー) W/s	$2\pi fVI$ $=2*\pi*100\text{Hz}*1.34\text{kV}*40\text{kA}$ $\doteq 3.3*10^{10}$ (10 乗オーダー) W/s
圧力×離隔距離 (縦軸)	$2.98\text{kPa} \times 0.5\text{ m}$ $\doteq 1.5*10^3\text{ Pa}\cdot\text{m}$	$62.5\text{kPa} \times 0.5\text{ m}$ $\doteq 3.1*10^4\text{ Pa}\cdot\text{m}$

注) f : 周波数 (全波整流波形となることから $50 \times 2 = 100\text{Hz}$)

V : アーク電圧, I : 試験電流

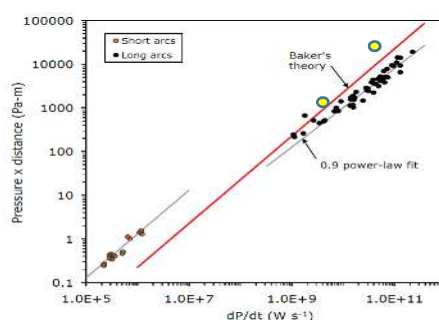


Figure 5 The results of Drouel and Nadeau for short (8 mm) and long (many meters) arcs

図 1-1 開放空間におけるアークパワーと圧力上昇の関係

出典 [1] V. Babrauskas, "Electric Arc Explosions", Proc. 12th Intl. Conf. Interflam, pp. 1283-1296,

2010

以上

資料 3-2 高エネルギーアーク損傷 (HEAF) に伴う火災対策に係る事業者の取り組み状況について (抜粋)

I-3. 試験条件(1/2)
5

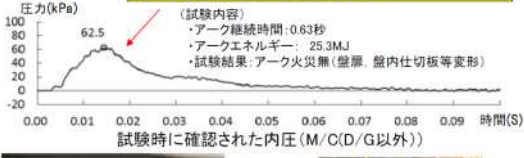
図・写真・出典(2)

- 試験方法は、「高エネルギーアーク損傷(HEAF)に係る電気盤の設計に関する審査ガイド」(以下、「審査ガイド」)を参照し、試験内容の妥当性を確認。(試験用電源盤の代表性、試験条件、アーク火災判定方法等)
- 主な試験条件を以下に示す。【審査ガイドの各項目適合状況:「Ⅲ 補足資料」参照】


(1)試験体の選定

同種類の電源盤単位(M/C・P/C・C/C毎)の場合は同等と扱い試験を実施

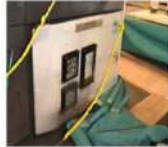
- アーク火災は、アーク放電エネルギーにより盤内で発生する高温ガスによる熱的影響により当該部位の可燃物が加熱され、アーク火災に至る。
 - 盤内圧力は、14.5msecでピーク(62.5kPa)、直後に圧力が抜ける
 - 圧力が抜けた後も、アークは継続(0.63秒)
- HEAF第一段階で盤内に発生した高温ガスによる盤内圧力上昇は、約0.01秒後にピークとなり約0.02秒後には圧力が抜ける。ボイル・シャルルの法則では、体積が一定の場合、圧力と温度は比例するが、電気盤は、盤の変形や開口部から圧力が抜けるため、盤内温度上昇に盤内容積の大小は直接寄与しない。また、盤内リレー・ケーブル等の可燃物は、同種類の電源盤(M/C・P/C・C/C)であれば、製造メーカーによらず、同程度であることを踏まえ、試験体を選定。



(試験内容)
 ・アーク継続時間:0.63秒
 ・アークエネルギー: 25.3MJ
 ・試験結果:アーク火災無(盤扉、盤内仕切板等変形)



試験時に確認された内圧(M/C(D/G以外))



試験後の盤正面の状態

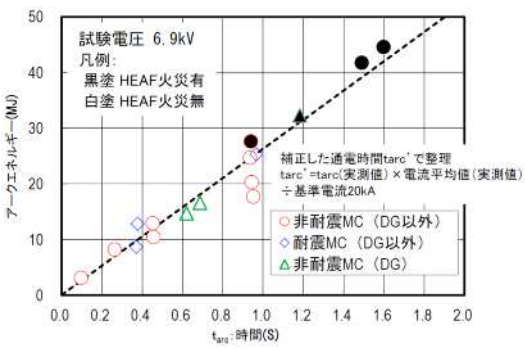
盤内仕切板の状態(母線室—遮断器室間)
試験後の盤正面の状態

補足1. 試験条件設定の考え方詳細
補 10

(3) 短絡電流の目標値(5/5)

○保護継電器の整定

- 試験毎に実測アーク電流は異なるものの基準試験電流20kAでアーク継続時間を補正した場合のアーク継続時間とアークエネルギーは比例関係を示すことから、保護継電器の設計においては、プラント電源盤固有の短絡電流値からアーク継続時間を換算し、換算したアーク継続時間以内に保護継電器の動作時間を設定する。



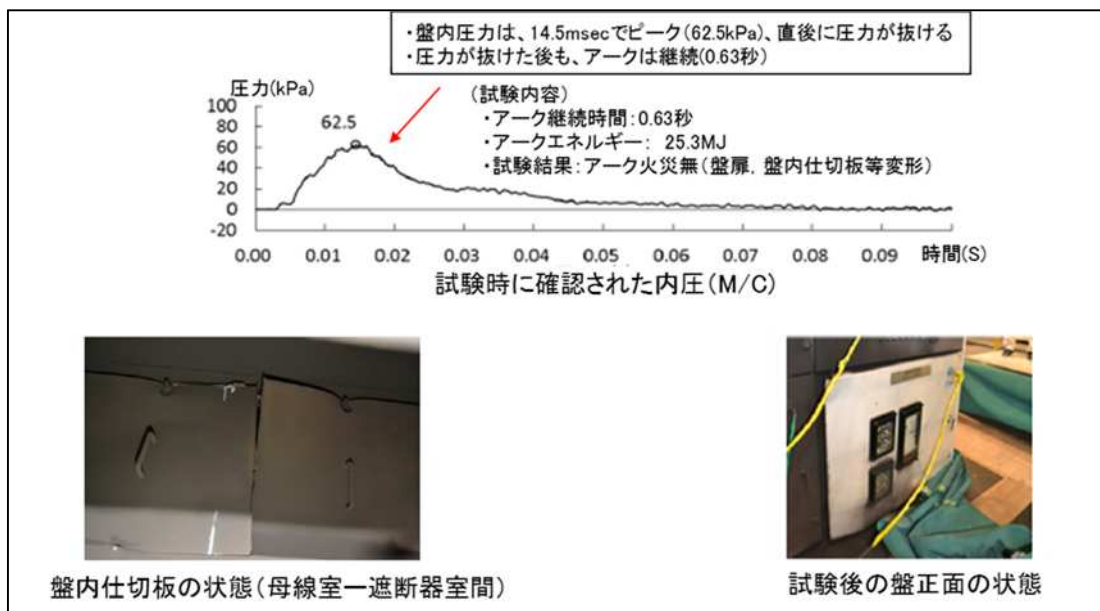
試験電圧 6.9kV
 凡例:
 黒塗 HEAF火災有
 白塗 HEAF火災無

補正した通電時間 t_{arc}^* で整理
 $t_{arc}^* = t_{arc}(実測値) \times 電流平均値(実測値) \div 基準電流20kA$

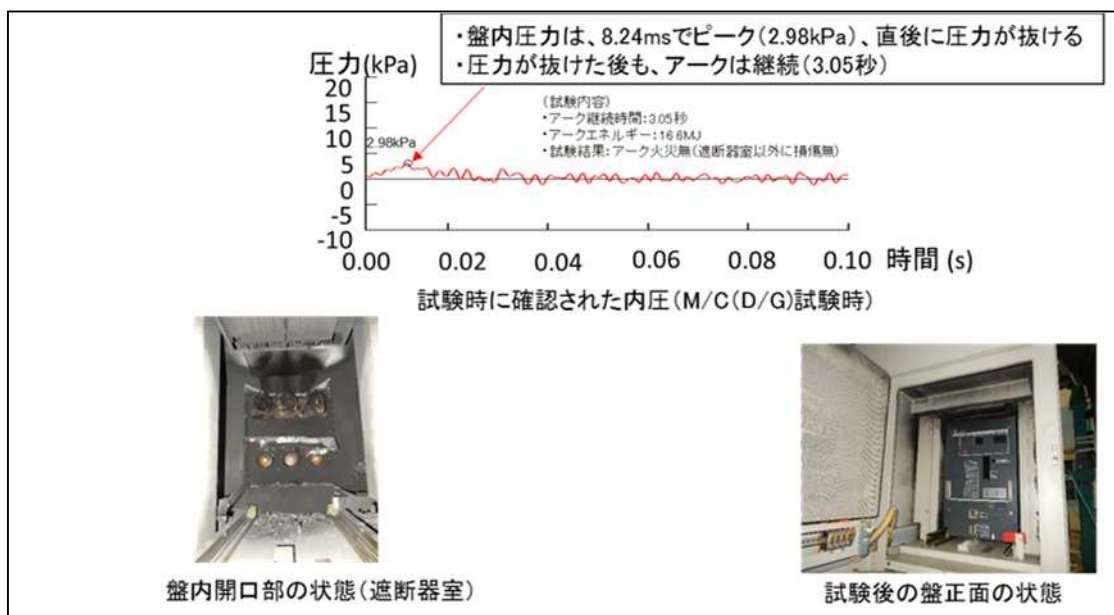
○ 非耐震MC (DG以外)
 ◇ 耐震MC (DG以外)
 △ 非耐震MC (DG)

アーク継続時間—アークエネルギーの関係(基準電流20kA補正)




(1) 先行 M/C 試験の電気盤内圧



(2) M/C (D/G) 試験の電気盤内圧



別表 1 M/C (D/G) 試験と先行 M/C 試験の相違点について (1/3)

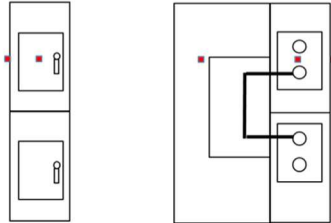
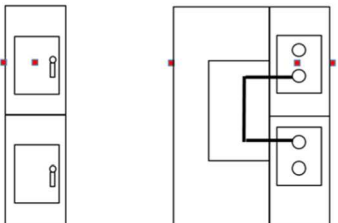
試験盤	M/C (D/G) 試験	先行M/C試験	
	試験盤 ⑦	試験盤①	試験盤②
	非耐震 7.2kV	非耐震 7.2kV	耐震 7.2kV
対象機器			
相数	三相		
試験周波数	50 Hz		
試験電圧	6.9 kV	6.9 kV	8.0 kV
試験電流	5.0 kA	18.9 kA	40.0 kA
発弧箇所	遮断器室	ケーブル室または遮断器室	

別表1 M/C (D/G) 試験と先行M/C試験の相違点について (2/3)

試験盤	M/C (D/G) 試験		先行M/C試験	
	試験盤⑦		試験盤①	試験盤②
遮断器室内※1				
開口部等による高温ガスの主な放出経路※1	<ul style="list-style-type: none"> ・通気口 ・遮断器室-母線室間の仕切り板の隙間 (盤の変形はほとんど見られず) 		<ul style="list-style-type: none"> ・扉と盤筐体との隙間 ・上下段遮断器室間の仕切り板の隙間 ・外れた天板、変形した扉・側板 	<ul style="list-style-type: none"> ・天板(ケーブル引込口部) ・上下段遮断器室間の仕切り板の隙間 ・外れた天板、外れた仕切り板、変形した扉・側板
電気盤内の主な圧力測定箇所※2	発弧箇所を有する電気盤の正面扉、側面		発弧箇所を有する電気盤の正面扉、側面、背面	
圧力測定器				
	<p>ひずみゲージ方式、定格容量: 200kPa (精度: ±1.5%RO以内※3) サンプルング時間: 20 μs以上</p>			

※1, 2: 開口部箇所(高温ガス放出経路含む)、圧力測定箇所については次項参照。
 ※3: センサーメーカーカタログ値では、±1.5%RO以内となっているものの、M/C(DG)試験データにおいて、公開文献「公益財団法人日本適合性認定協会「JAB NOTE 4 不確かさの求め方(電気試験/大電力試験分野)JAB RL504:2013」」に基づき不確かさを算出したところ、3%程度であり、2.89~3.07の間に真値が存在する。

別表1 M/C (D/G) 試験と先行M/C試験の相違点について (3/3)

試験盤	M/C (D/G) 試験	先行M/C試験	
	試験盤⑦	試験盤①	試験盤②
開口箇所 (イメージ図)	[Blank area for opening point diagrams]		
電気盤内の主な圧力測定箇所 (イメージ図)	<p>▪ 圧力測定箇所(正面、側面)</p>  <p>正面 側面</p> <p>※発弧位置が正面左上段の遮断器の場合</p>	<p>▪ 圧力測定箇所(正面、側面、背面)</p>  <p>正面 側面</p> <p>※発弧位置が正面左上段の遮断器の場合</p>	

火災感知設備及び消火設備の配置について

柏崎刈羽原子力発電所第7号機の火災感知設備及び消火設備の配置について以降に示す。なお、配置図の凡例については、下記に記載のとおりとする。

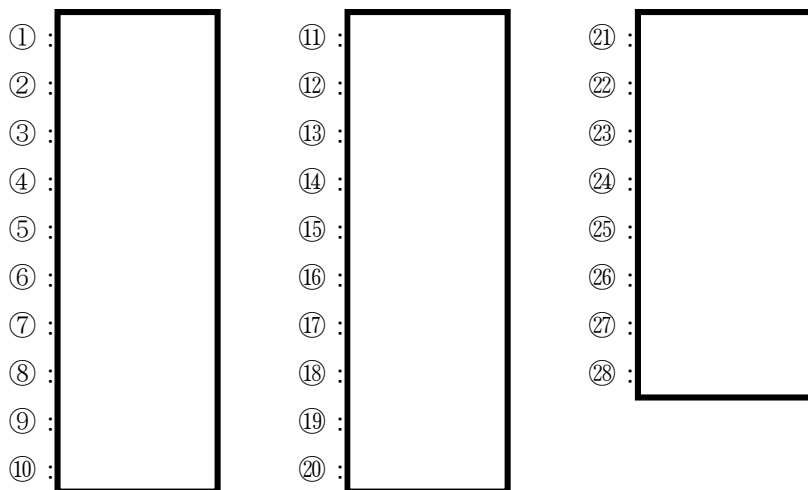
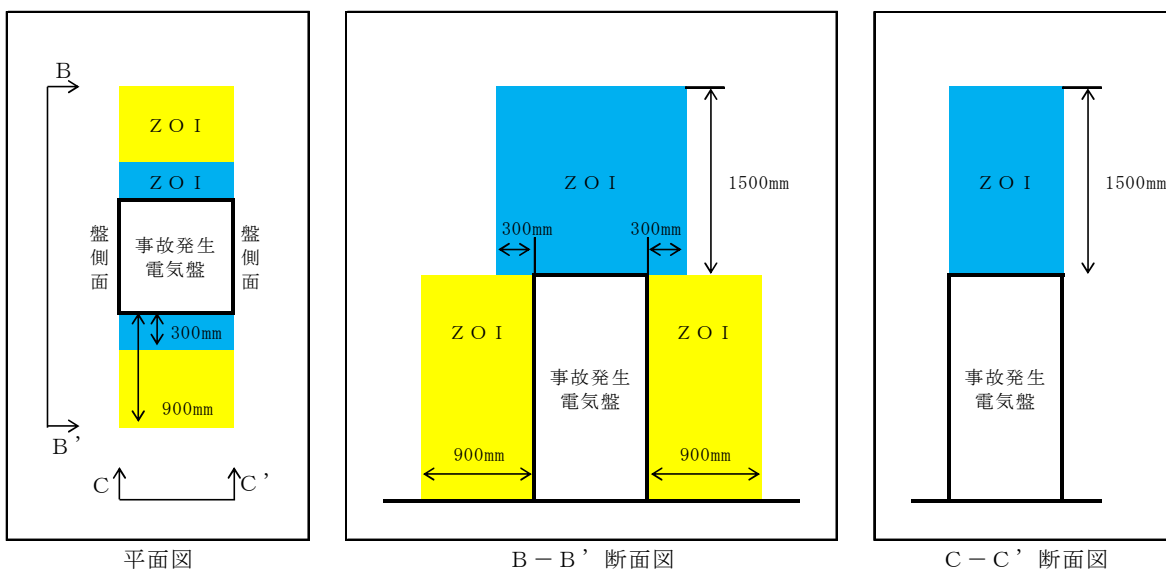
【凡例】

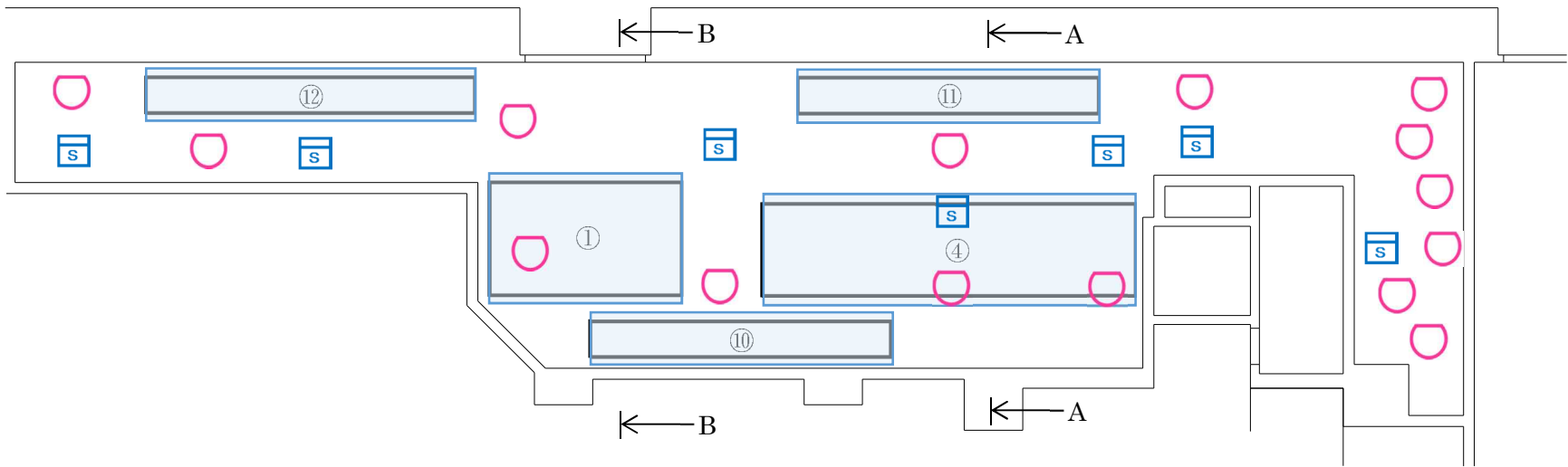
- s (平面図) , □ (断面図) : 煙感知器
- (平面図) , □ (断面図) : 熱感知器
- (平面図), ■ (断面図) : 垂直方向のZOI影響範囲 (※)

※ZOI (Zone Of Influence) とは

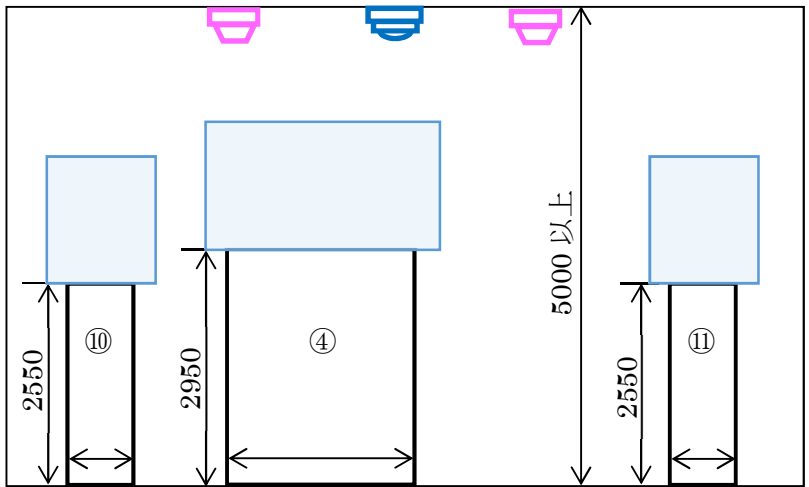
電気盤内で発生したアーク放電の盤外への影響範囲のこと。詳細については下図参照。

- : 垂直方向への影響範囲
- : 水平方向への影響範囲

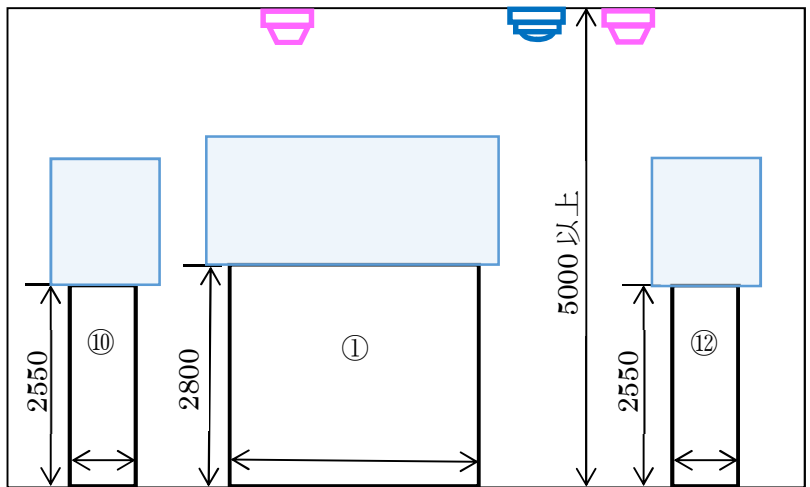




原子炉建屋 非常用電気品室

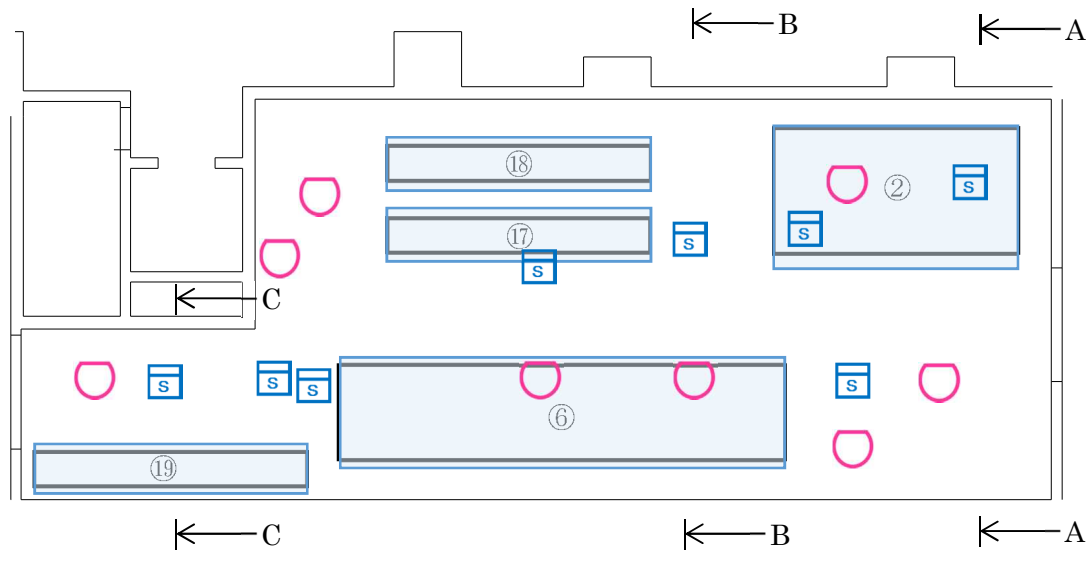


A - A 断面



B - B 断面

図1 火災感知設備及び消火設備の配置図 (1/10)



3

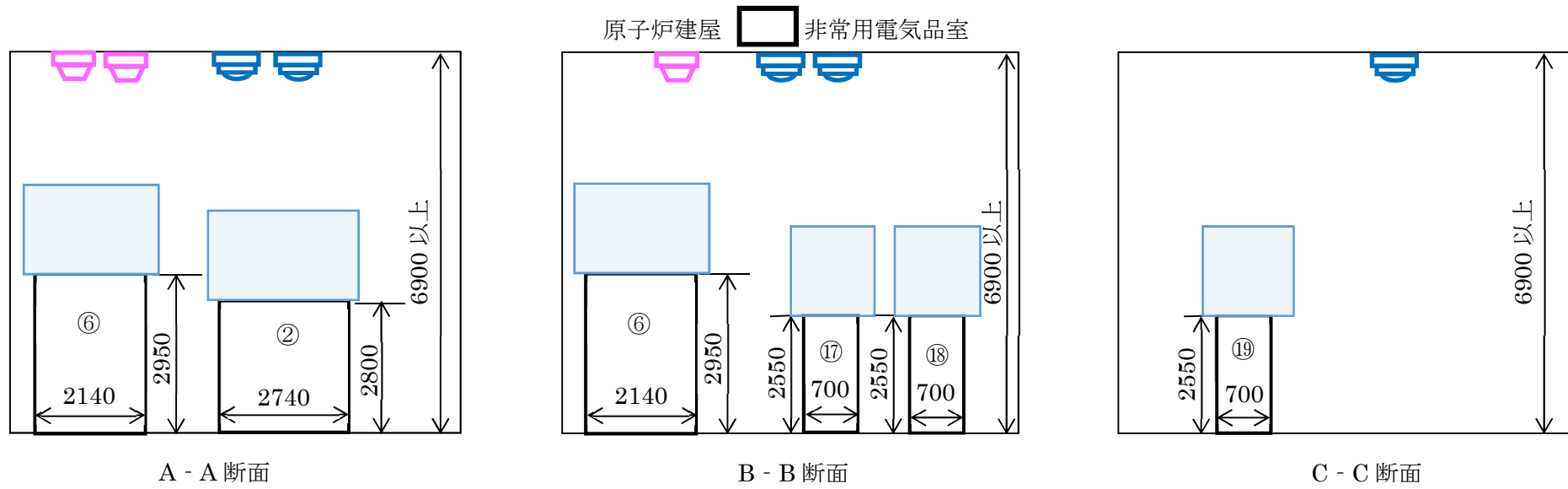
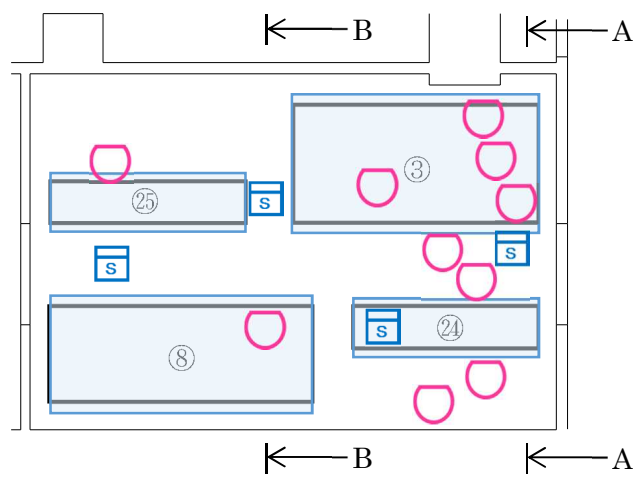
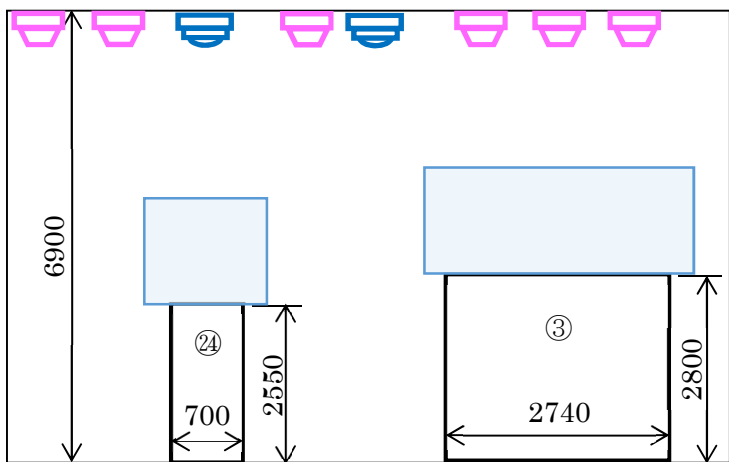


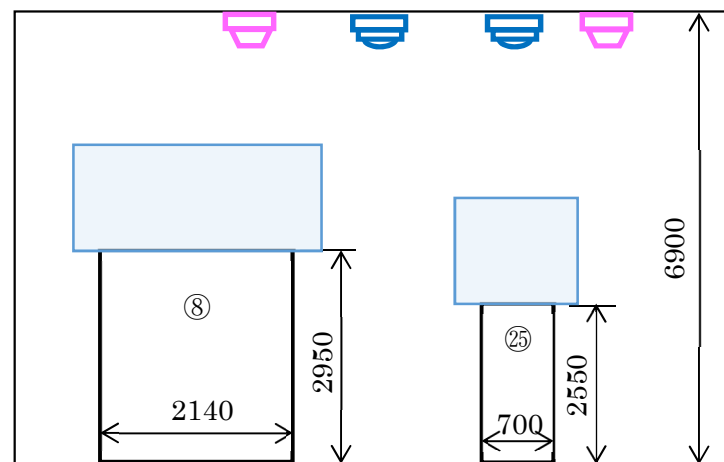
図1 火災感知設備及び消火設備の配置図 (2/10)



原子炉建屋 非常用電気品室

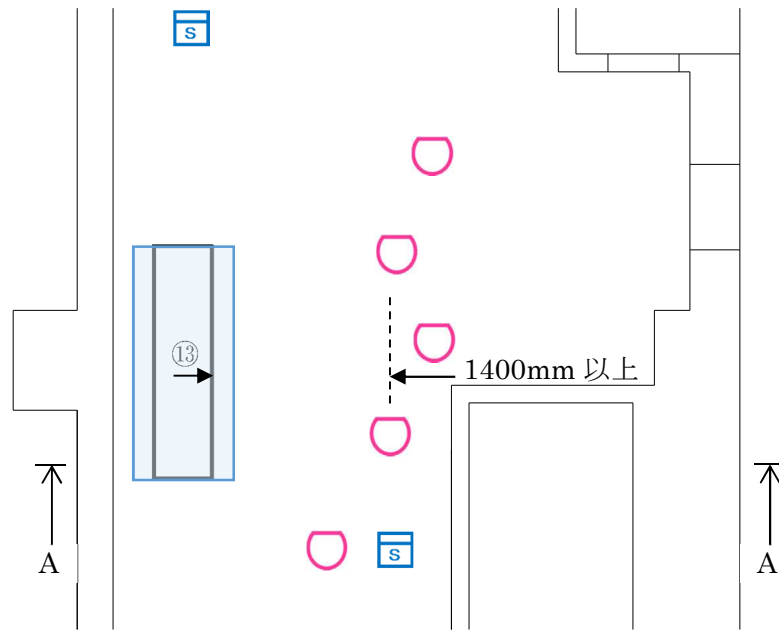


A - A 断面

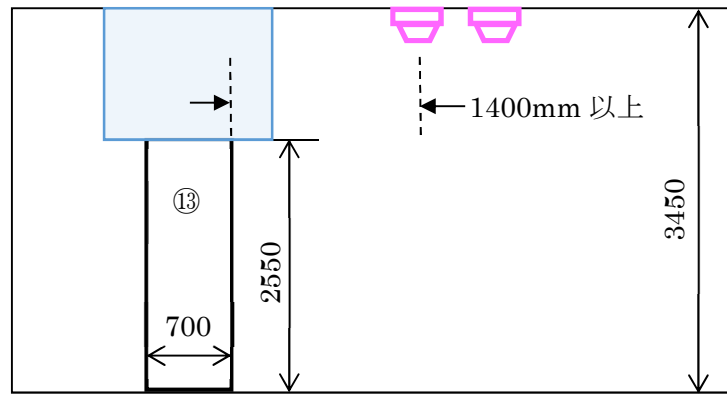


B - B 断面

図1 火災感知設備及び消火設備の配置図 (3/10)

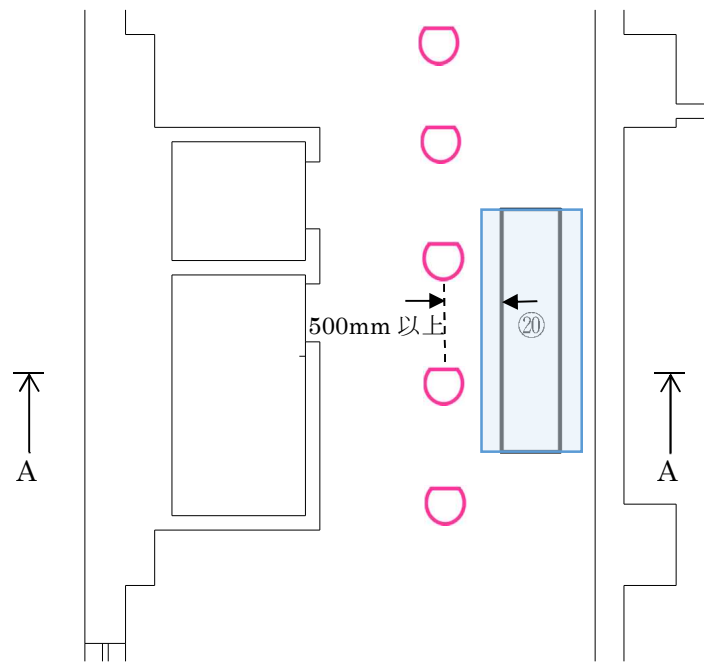


原子炉建屋 3階

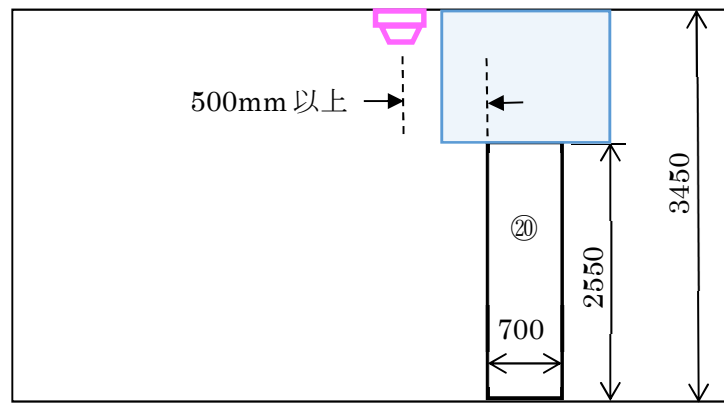


A - A 断面

図1 火災感知設備及び消火設備の配置図 (4/10)

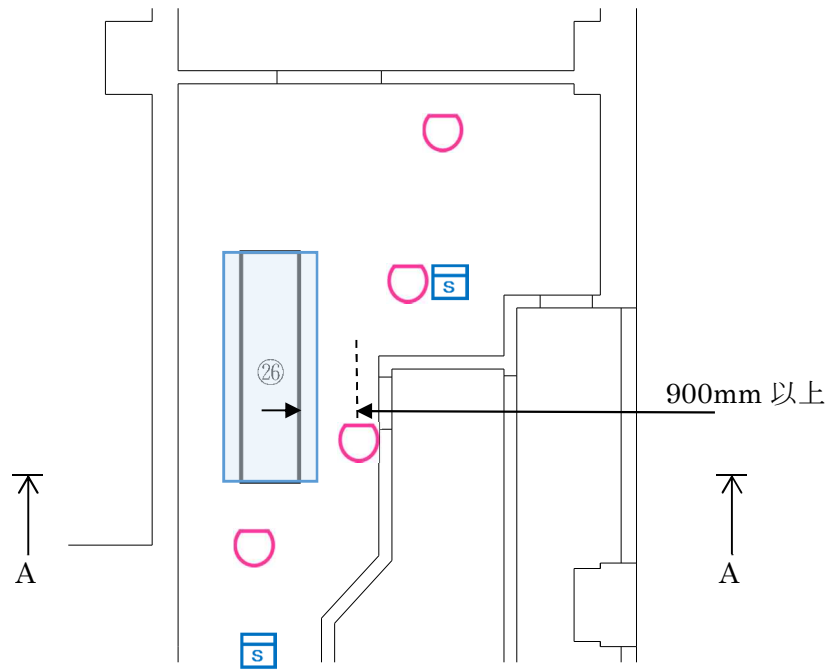


原子炉建屋 3階

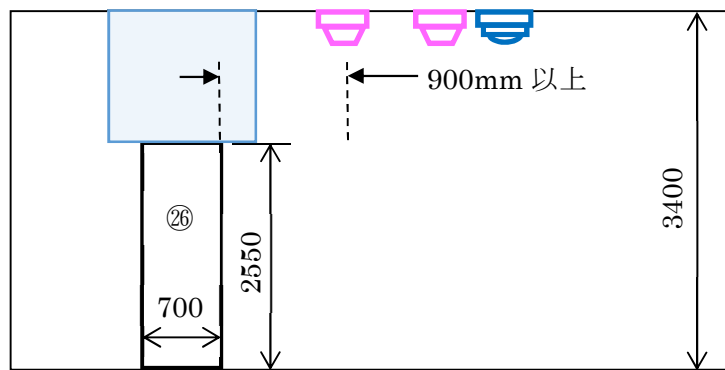


A - A 断面

図1 火災感知設備及び消火設備の配置図 (5/10)

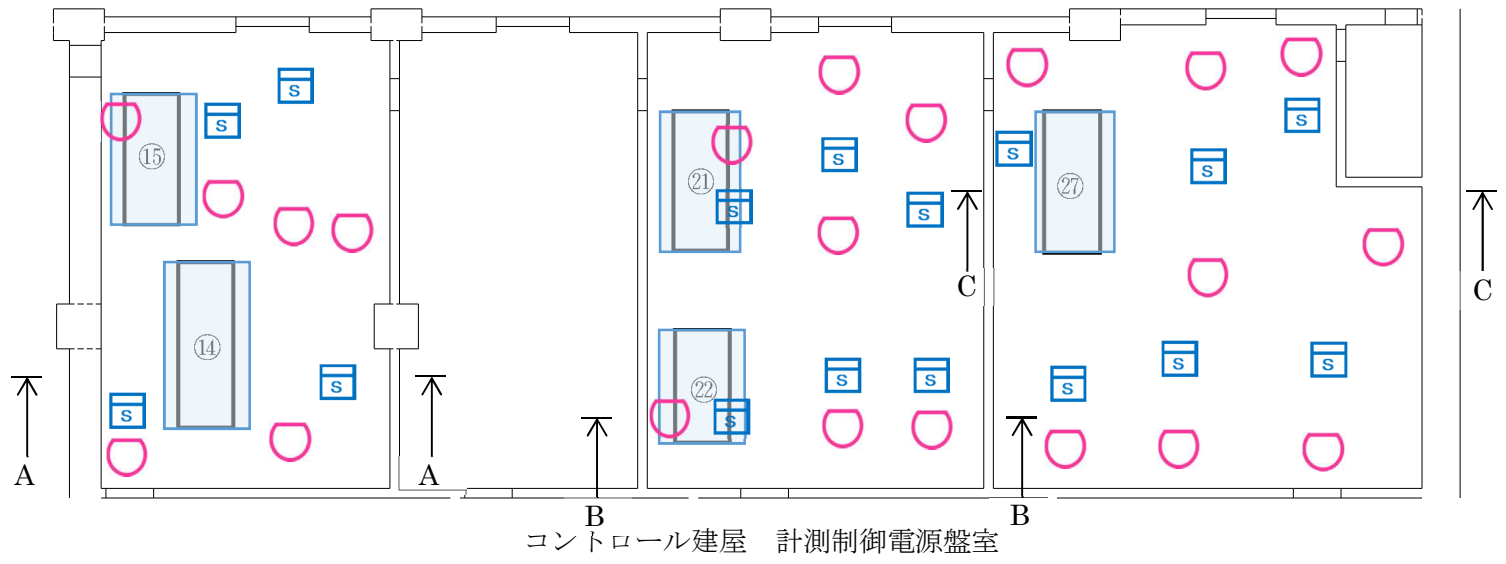


原子炉建屋 3階



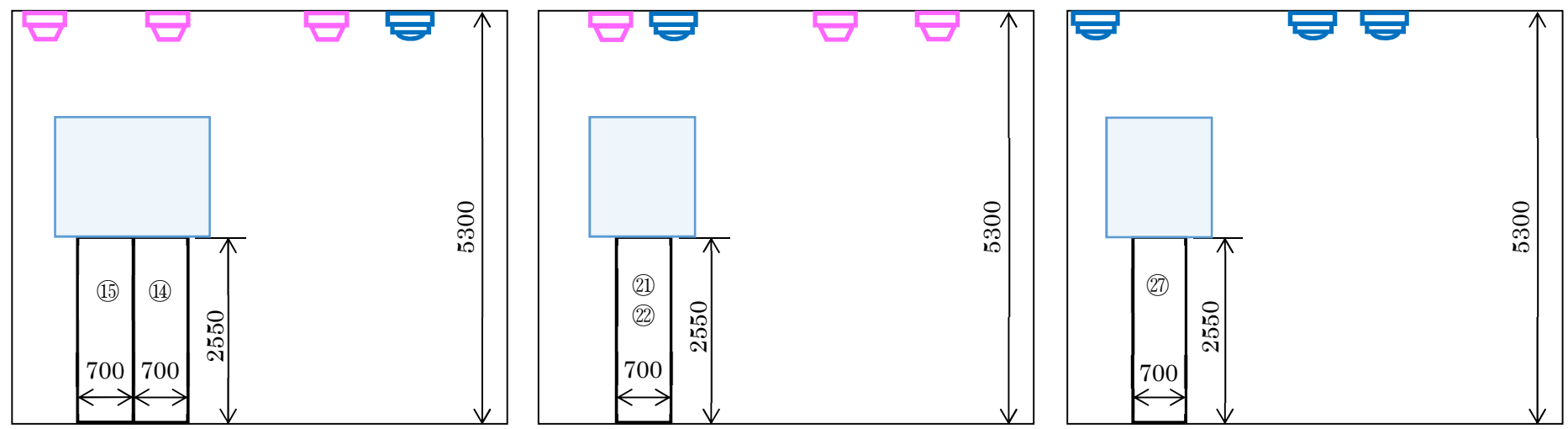
A - A 断面

図1 火災感知設備及び消火設備の配置図 (6/10)



コントロール建屋 計測制御電源盤室

8



A - A 断面

B - B 断面

C - C 断面

図1 火災感知設備及び消火設備の配置図 (7/10)

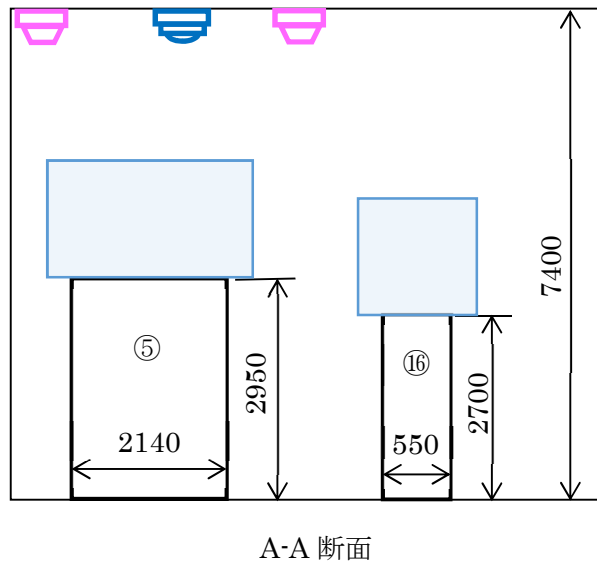
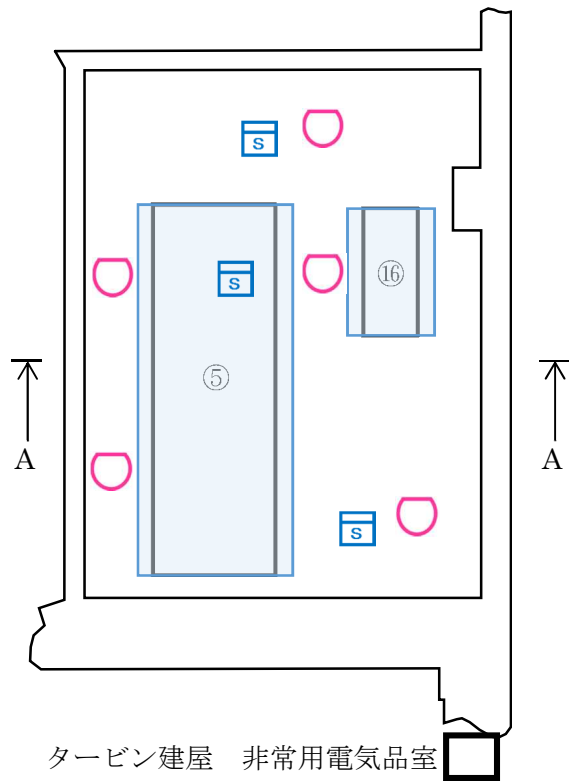


図1 火災感知設備及び消火設備の配置図 (8/10)

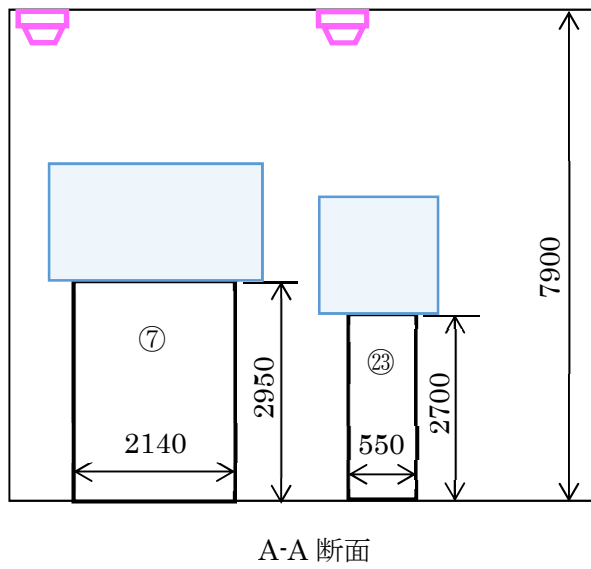
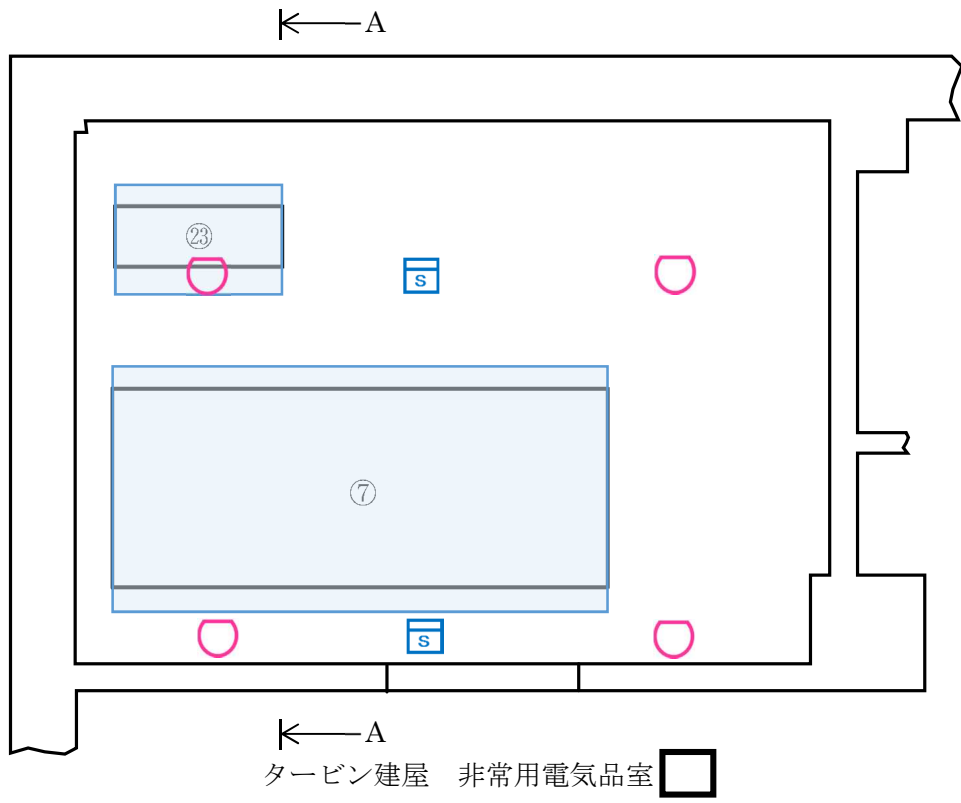
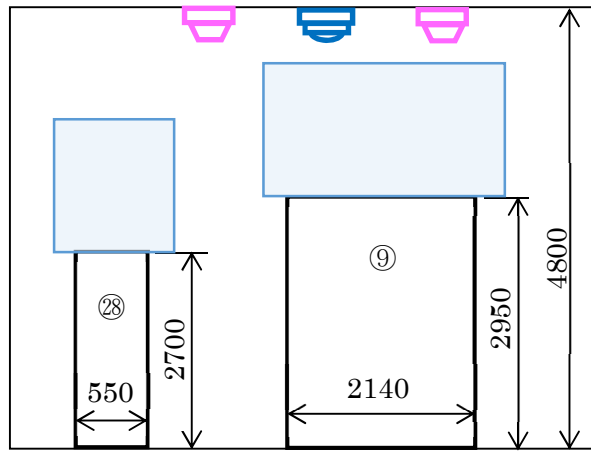
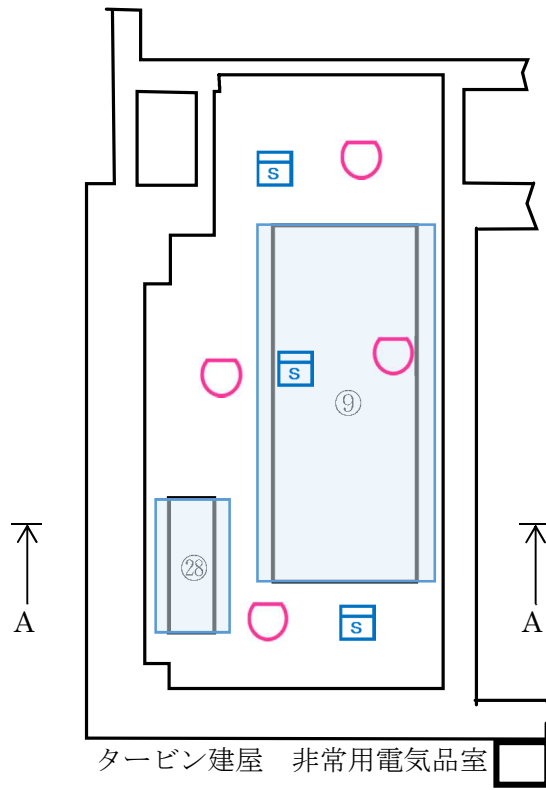


図1 火災感知設備及び消火設備の配置図 (9/10)



A-A 断面

図 1 火災感知設備及び消火設備の配置図 (10/10)

D/G 保護ロジックへのインターロック追加に関わる既存設備への影響について

1. はじめに

D/G 保護ロジックへのインターロック追加において、既存設備への影響確認を実施するものである。

2. インターロック追加における回路構成について

今回追加するインターロックの概略イメージについて図 2-1 に示す。

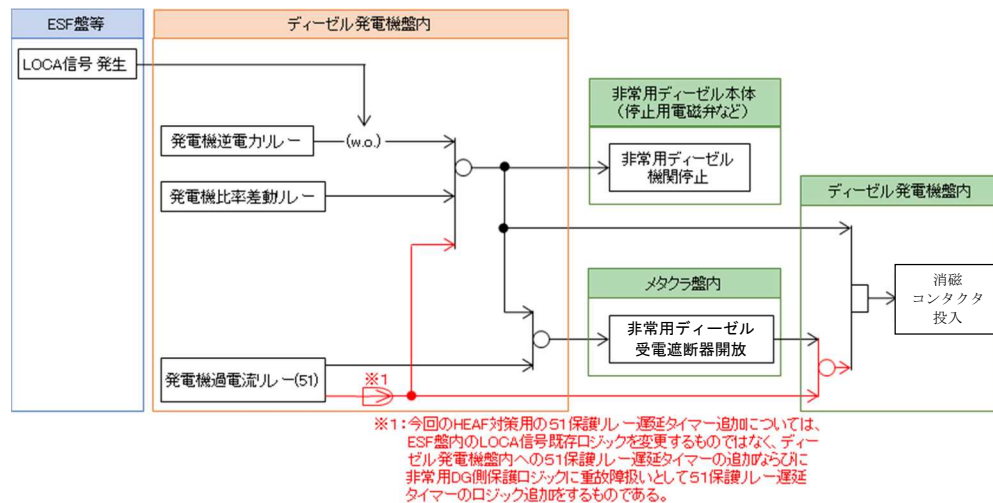


図 2-1 回路構成概略図 (イメージ)

図 2-1 に示す通り、インターロック追加は既存の保護ロジック回路構成を変更するものではなく、D/G 制御盤内の既存 51 保護リレーにタイマー等を追加することにより、D/G の機関停止及び消磁コンタクト投入のインターロックを追加するものである。

なお、既存の D/G 制御盤内に回路を追加し、耐震、溢水影響等については既評価から変更が無いよう設計する。また、本インターロックについては、既認可の設計を変更するものでもない。

【インターロック追加設計の考え方】

- D/G 受電遮断器での HEAF 発生に起因した短絡電流を、アーク火災に至る前に遮断することを目的としている。
- D/G による給電時においても、HEAF による電気盤の損壊の拡大を防ぐため、アーク放電継続時は D/G の機関を停止する。
- 上記に加え、アークエネルギー抑制の観点から、D/G の機関停止後速やかに HEAF 発生点である D/G 受電遮断器への短絡電流供給を停止する必要があるため、D/G の消磁コンタクトを投入することで、短絡電流を減衰させる。

3. 保護ロジックにおける設計思想について

今回追加する D/G の機関を停止するインターロックは、HEAF 火災を発生させないことを目的に設置するものであるが、図 3-1 に示す通り、発電機比率作動継電器（87 保護リレー）、発電機逆電力継電器（67 保護リレー）と同じ設計思想（1/1 ロジックで動作）とすることが妥当である。また、この設計思想については、M/C の保護リレーの設計思想（1/1 ロジックで動作）とも整合している。

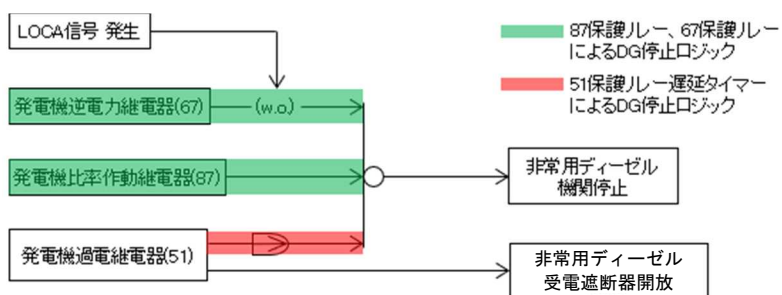


図 3-1 D/G 停止インターロック

4. インターロック追加による D/G への悪影響を防止するための設計上の考慮について

(1) 追加するインターロック回路の故障による悪影響に対する設計上の考慮

追加するインターロック回路については、設置許可基準規則第 12 条第 1 項及びその解釈、並びに設置許可添付書類八の設計方針に基づき、D/G と分離及び隔離する必要がある。

【設置許可基準規則 第12条第1項】

安全施設は、その安全機能の重要度に応じて、安全機能が確保されたものでなければならない。

【設置許可基準規則の解釈 第12条】

第 1 項に規定する「安全機能の重要度に応じて、安全機能が確保されたもの」については、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」による。ここで、当該指針における「安全機能を有する構築物、系統及び機器」は本規定の「安全施設」に読み替える。

【発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針】

IV. 分類の適用の原則

3. 分離及び隔離の原則

安全機能を有する構築物、系統又は機器は、これら二つ以上のもの間において、又は安全機能を有しないものとの間において、その一方の運転又は故障等により、同位ないし上位の重要度を有する他方に期待される安全機能が阻害され、もって原子炉施設の安全が損なわれることのないように、機能的隔離及び物理的分離を適切に考慮しなければならない。

【設置許可 添付書類八】

1.3 安全機能の重要度分類

1.3.2 分類の適用の原則

(3) 安全機能を有する構築物、系統又は機器は、これら二つ以上のもの間において、又は安全機能を有しないものとの間において、その一方の運転又は故障等により、同位ないし上位の重要度を有する他方に期待される安全機能が阻害され、もって発電用原子炉施設の安全が損なわれることのないように、機能的隔離及び物理的分離を適切に考慮する。

(4) 重要度の異なる構築物、系統又は機器を接続するときは、下位の重要度のものに上位の重要度のものと同等の設計上の要求を課すか、又は上位の重要度のものと同等の隔離装置等によって、下位の重要度のものの故障等により上位の重要度のものの安全機能が損なわれないように、適切な機能的隔離が行われるよう考慮する。

ただし、本申請では HEAF 対策を目的としてインターロック回路と D/G を相互接続する必要があるため、故障によって D/G の安全機能の遂行が阻害されることがないように、以下の運転管理・施設管理による対応を行うものとする。

なお、これらは保安規定に定める運転管理、施設管理に従い実施するものであり、インターロック追加に伴い保安規定を変更するものではない。

① 運転管理による対応

51 保護リレーは、柏崎刈羽原子力発電所原子炉施設保安規定の第 12 条（運転管理業務）の 2(1), (3), (4), 第 13 条（巡視点検）第 1 項, 第 14 条（マニュアルの作成）による運転管理の対象として、運転員が運転監視、巡視点検、運転操作、警報発信時の対応、故障時の対応、定期的な試験・確認等を実施することとなる。

具体的には、当該保護リレーの異常有無は巡視点検時に目視にて確認する。

更に、定期的な D/G サーベランス時にも、当該保護リレーに異常がないことを目視にて確認する。

警報発信時の対応については予め手順書に定めて運用し、運転員が当該保護リレーの故障を発見した場合には直ちに保全部に点検・復旧を依頼する。

なお、D/G 運転中に万一当該保護リレーが故障した場合、機関の停止回路が動作し、或いは D/G 受電遮断器が開放され、D/G からの給電が停止する可能性が考えられる。ただし、非常用電源系統は、1つの非常用母線で原子炉を安全停止することができるよう多重性・独立性を有する設計となっていることから、1つの当該保護リレーが故障したとしても、健全側の D/G にて事故の収束は可能である。D/G 待機中に万一当該保護リレーが故障し、誤動作して D/G 停止信号を発信した場合、又は復旧作業のために電源隔離を行う場合、D/G が待機除外となるため、プラント運転中であれば柏崎刈羽原子力発電所原子炉施設保安規定第 59 条（非常用ディーゼル発電機その 1）で定められている AOT10 日以内（動作可能な外部電源が 1 回線である場合は 12 時間以内）に復旧できなければプラント停止が必要となる。

② 施設管理による対応

保全部は、当該保護リレーの保全計画を策定し、計画的に点検を実施することで設備の健全性を維持する。

また、運転管理部から当該保護リレーの点検・復旧依頼があった場合は、可及的速やかに復旧作業を開始する。

当該保護リレーの復旧は、リレーケースを引き抜くことで保護リレー単独で取替えが可能である。以下の手順により約 10 時間で復旧可能と考えている。復旧後は、D/G 停止信号をリセットし、D/G を再起動することができる。

- ・作業準備 : 約 1 時間
- ・取替品の運搬 : 約 1.5 時間
- ・作業員の確保 : 約 6.5 時間
- ・取替作業 : 約 1 時間

上記の運転管理及び施設管理に係る業務は、柏崎刈羽原子力発電所原子炉施設保安規定第3条（品質マネジメント計画）に基づき実施することで、当該保護リレーの健全性を維持するとともに、異常の早期発見及び早期復旧に努め、偶発故障（悪影響）に対応する。

柏崎刈羽原子力発電所原子炉施設保安規定第59条（非常用ディーゼル発電機その1）
（抜粋）（参考）

（非常用ディーゼル発電機その1）

第59条 原子炉の状態が運転、起動及び高温停止において、非常用ディーゼル発電機^{※1}は表59-1で定める事項を運転上の制限とする。

2. 非常用ディーゼル発電機が前項で定める運転上の制限を満足していることを確認するため、次の各号を実施する。

(1) 運転評価GMは、定事検停止時に、非常用ディーゼル発電機が模擬信号で作動することを確認し、その結果を当直長に通知する。

(2) 当直長は、原子炉の状態が運転、起動及び高温停止において、表59-2に定める事項を確認する。

3. 当直長は、非常用ディーゼル発電機が第1項で定める運転上の制限を満足していないと判断した場合、表59-3の措置を講じる。

表59-1

項目	運転上の制限
非常用ディーゼル発電機	3台 ^{※2} の非常用ディーゼル発電機が動作可能であること

※1：7号炉の非常用ディーゼル発電機及びデイトンクは、重大事故等対処設備（設計基準拡張）を兼ねる。

※2：3台とは、A系、B系及び高圧炉心スプレイ系（6号炉及び7号炉においてはC系）をいう。

2. 6号炉及び7号炉		
条 件	要求される措置	完了時間
A. 非常用ディーゼル発電機1台が動作不能の場合	A 1. 非常用ディーゼル発電機を動作可能な状態に復旧する。 及び A 2. 残り2台の非常用ディーゼル発電機について動作可能であることを確認する。 及び A 3. 原子炉隔離時冷却系について動作可能であることを確認する。※3	10日間 速やかに 速やかに
B. 条件AのA1で要求される措置（非常用ディーゼル発電機の復旧措置）を完了時間内に達成できない場合	B 1. 動作可能な非常用ディーゼル発電機を運転状態とする。 及び B 2. 非常用ディーゼル発電機を動作可能な状態に復旧する。	速やかに 30日間
C. 非常用ディーゼル発電機1台が動作不能の場合 及び 外部電源が1系列しか動作可能でない場合	C 1. 当該非常用ディーゼル発電機を動作可能な状態に復旧する。 又は C 2. 外部電源を2系列動作可能な状態に復旧する。	12時間 12時間
D. 条件A（A1の措置を除く。）、B又はCで要求される措置を完了時間内に達成できない場合 又は 非常用ディーゼル発電機2台以上が動作不能の場合	D 1. 高温停止とする。 及び D 2. 冷温停止とする。	24時間 36時間

※3：原子炉圧力が1.03MPa[gage]以上の場合に適用する。

(参考) 51 保護リレー及びタイマーのプラント信頼性評価への影響

現在プラントの信頼性評価では、NUCIA データ『原子力発電所に関する確率論的安全評価用の機器故障率の算出（1982年度～1997年度16ヵ年49基データ改訂版）』（別添2参照。）で定義されている機器バウンダリに基づき実施している。

当該リレー及びタイマー誤動作による機関の停止については、“D/Gの計測制御回路”として当該リレー及びタイマーをD/Gのバウンダリに含めて取り扱っている※1。

すなわち、D/Gの故障率には当該リレー及びタイマーの要因による故障率も含まれているため、当該リレー及びタイマー設置によるプラントの信頼性評価への影響はない※2。

注記※1 : PRA で使用している NUCIA の故障率データは、国内プラント全体の過去の故障実績を集計して統計的に算出された値を使用している。その故障実績の集計に際して、機器ごとに機器バウンダリが定められている。機器バウンダリ内の故障要因により当該機器が機能喪失した実績は、当該機器の故障実績としてカウントされる。そのため、当該機器の故障率に含まれる。一方、機器バウンダリ外の故障原因により当該機器が機能喪失した実績は、当該機器の故障実績としてカウントされない。そのため当該機器の故障率には含まれない。また、NUCIA 資料『原子力発電所に関する確率論的安全評価用の機器故障率の算出(1982 年度～1997 年度 16 カ年 49 基データ 改訂版)』の 68 頁に D/G のバウンダリの説明の図と表があり、この表の中でバウンダリ内の「計測制御装置」の設備として、「冷却水流量、潤滑油圧力、機関速度等に係る検出器・変圧器・保護リレー、その他」が挙げられる。

「冷却水流量、潤滑油圧力、機関速度等」といった故障要素は D/G 故障ロックアウトリレーを動作させ機関を直接停止させるものである。当該 51 保護リレー及びタイマーについても電気系の保護信号ではあるものの、先の保護信号と並列なインターロック回路を構成し D/G 故障ロックアウトリレーを動作させることから、当該 51 保護リレー及びタイマーについても先の保護信号用の保護リレーと同様に D/G バウンダリ内の設備として整理されたと考える。

※2 : PRA で使用している NUCIA の故障率データは、各プラントの各機器の詳細な設計情報を分析して算出されたものではなく、国内プラント全体の過去の故障実績を集計して統計的に算出された値を使用している。よって、過去の実績に基づくものであり、現在の機器の設計が変更となっても即座に故障率に影響することはない。一方で、機器の設計が変更となった後は、その設計での故障実績が積みあがっていくので、将来的には故障率に影響が出てくる可能性はある。

なお、仮に D/G の故障率とは別に当該リレー及びタイマーの故障率を取り扱った場合でも、現在プラントの信頼性評価で使用している NUCIA データ『故障件数の不確かさを考慮した国内一般機器故障率の推定(1982 年度～2010 年度 29 ヶ年 56 基データ)』(別添 3 参照。)によれば、“D/G の運転継続失敗”の時間故障率($3.3 \times 10^{-4}/\text{hr}$)に対し、リレー誤動作の時間故障率($3.0 \times 10^{-9}/\text{hr}$)、タイマー誤動作の時間故障率($6.8 \times 10^{-9}/\text{hr}$)は十分に小さいものであり、D/G の信頼性に有意な影響を与えることはないと考えられる。

(2) 自然現象等を起因とした悪影響に対する設計上の考慮

今回のインターロック追加は、「令和2年10月14日付け原規規発第2010147号」（以下、設工認という。）で認可されたD/Gの自然現象等を起因とした悪影響に対する基準適合性に影響を与えないよう以下のとおり設計する。（図4-1参照）

- ・「地震」に対しては、追加するインターロック回路（タイマー等）はD/G制御盤内に設置し、耐震Sクラスの構造強度を有する設計とする。具体的には、D/G制御盤内の既設器具と同じ方法で盤内に取付け、固定することで、地震時に落下・脱落しない設計とする。また、追設するタイマー等の機能確認済加速度は、D/G制御盤の機能確認済加速度よりも大きく、かつ盤設置レベルの機能維持評価用加速度よりも大きくなる設計とすることで、地震によってタイマー等が故障（機能喪失）することはない。
- ・「津波、外部衝撃、火災及び蒸気タービン・発電機等の損壊に伴う飛散物」に対しては、タイマー等を設工認において基準適合性が確認されているD/G制御盤内に設置することで、悪影響を及ぼさない設計とする。
- ・「溢水」に対しては、タイマー等をD/G盤内の溢水防護上配慮が必要な高さ以上に配置することで、悪影響を及ぼさない設計とする。

また、「電気系統」の観点で今回のタイマー追設がD/Gに悪影響を及ぼさないように、タイマーは非常用電源系から受電し、タイマー等は単独でも施設管理が可能な設計とする。

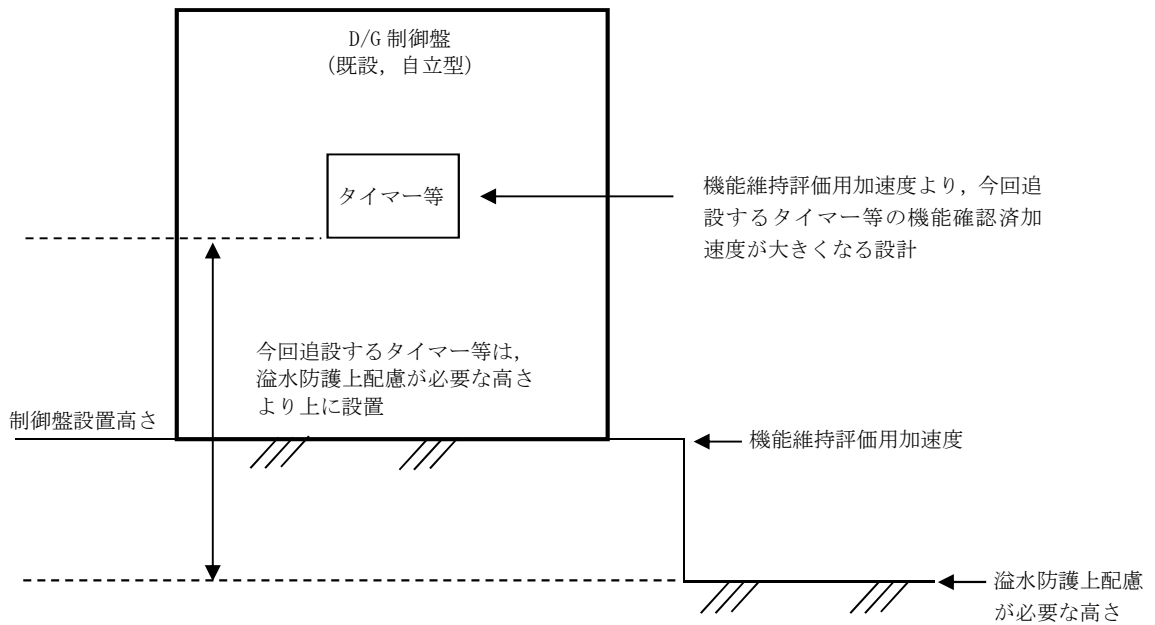


図 4-1 D/G 制御盤内のタイマー等設置イメージ

表 4-1 機能確認済加速度と機能維持評価用加速度の比較 (D/G 制御盤)

(9.8m/s²)

	機能維持評価用 加速度	機能確認済加速度	
		タイマー等	盤
水平方向	1.27	<input type="text"/>	<input type="text"/>
鉛直方向	1.15	<input type="text"/>	<input type="text"/>

表 4-2 制御盤設置高さと溢水による溢水防護上配慮が必要な高さの比較

(単位 : m)

	制御盤設置高さ	溢水防護上配慮が必要な高さ
D/G7A 制御盤	T. M. S. L. 23. 500	T. M. S. L. <input type="text"/>
D/G7B 制御盤	T. M. S. L. 23. 500	T. M. S. L. <input type="text"/>
D/G7C 制御盤	T. M. S. L. 23. 500	T. M. S. L. <input type="text"/>

5. まとめ

今回のインターロック追加は、D/G 給電時における電気事故（短絡事故）を検出する目的で設置していることから、D/G の保護リレー設計と整合した考え方（A 系 1 台、B 系 1 台、C 系 1 台）で設計している。

また、インターロックは HEAF 対策を目的として、D/G の機関停止を実施することとなるが、既存の D/G の保護ロジック回路の構成を変更するものではなく、D/G 制御盤内にタイマー等を設置することで D/G の自然現象等に対する基準適合性に影響がないように設計しており、運転管理面及び施設管理面の対応により、保護リレーの健全性を維持するとともに、異常の早期発見及び早期復旧に努め、偶発故障（悪影響）の防止を図る方針としている。

以上のとおり、今回追加するインターロックが D/G に悪影響を及ぼさないように設計上の考慮を行っている。

以 上

D/G 給電時の HEAF 火災対策の検討について

1. はじめに

D/G からの給電時において HEAF が発生した場合の HEAF 火災対策案を比較検討する。

2. HEAF 発生条件

図 2-1 に D/G から M/C に給電する場合の概略電源構成を示す。HEAF は、D/G からの給電中における短絡事故に起因して発生するものとし、想定しうる事故点は図 2-1 に示す事故点 1, 2 となる。

事故点 1 : 補機フィード遮断器での短絡事故

事故点 2 : D/G 受電遮断器での短絡事故

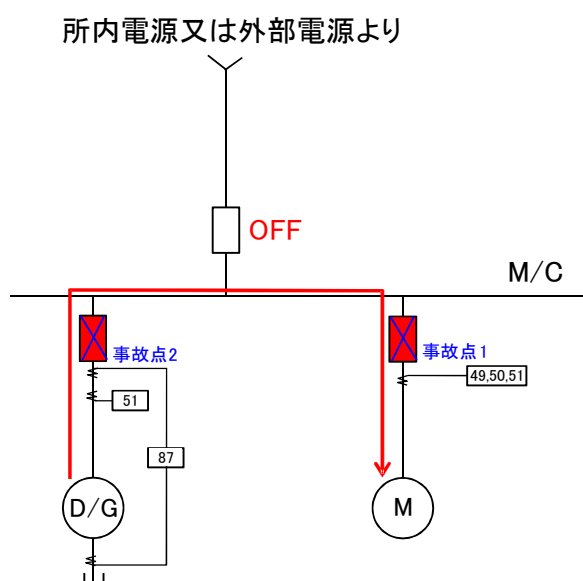


図 2-1 M/C への D/G 給電時概略電源構成

3. 通常保護の考え方

図 2-1 に示す事故点 1, 2 にて HEAF が発生した場合に, D/G 給電中における通常保護の考え方は以下の通りとする。

事故点 1 :

D/G 給電時に補機フィーダ遮断器にて事故が発生した場合、フィーダ遮断器の開放による短絡電流の遮断は基本的に不可となる。そのため、図 3-1 に示す通り D/G 用の過電流保護 51 リレーにて短絡電流を検知し、D/G 受電遮断器を開放し短絡電流を遮断する。

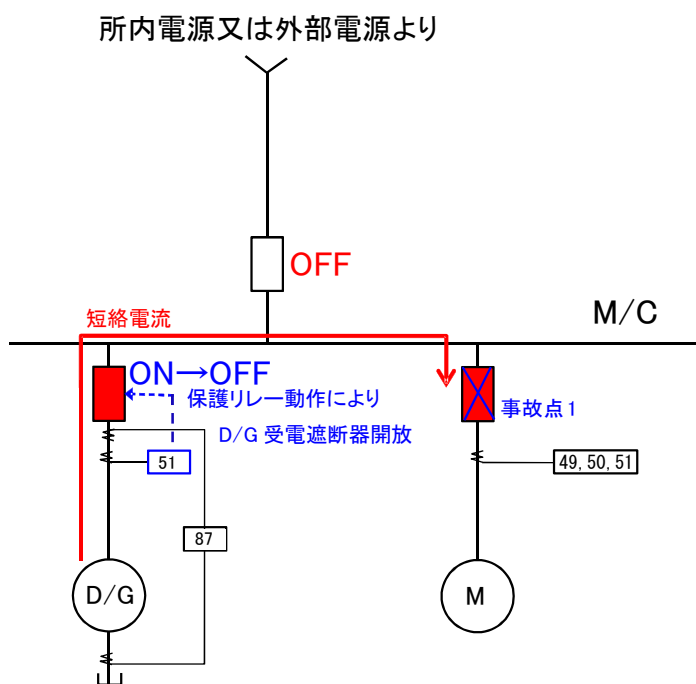


図 3-1 補機フィーダ遮断器での短絡時(事故点 1)における HEAF 火災からの保護

事故点 2 :

D/G から給電中に D/G 受電遮断器にて事故が発生した場合、**図 3-2** に示す通り D/G 用過電流保護 51 リレーにて短絡電流を検知することとなるが、D/G 受電遮断器は故障していることを想定する。本事故点での HEAF 発生時には短絡電流を遮断器開放により遮断することができないため、D/G 機関の停止後の短絡電流減衰による HEAF 火災抑制に期待することとなる。

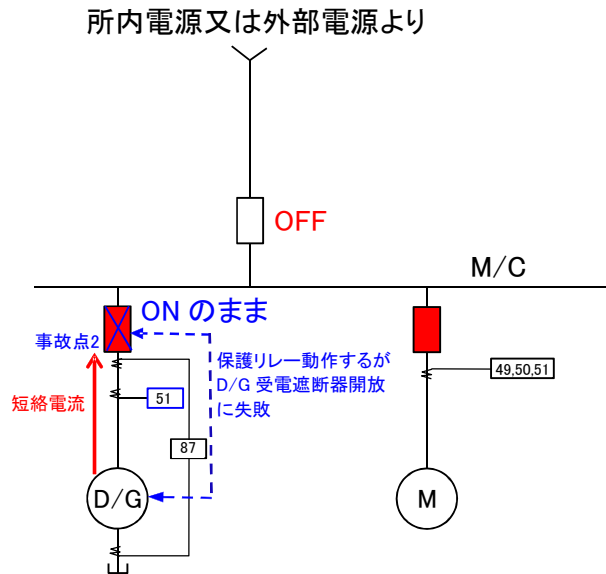


図 3-2 D/G 受電遮断器での短絡時(事故点 2)における HEAF 火災からの保護

D/G 用の過電流保護 51 リレー動作による D/G 機関の停止ロジックが存在しないため、短絡電流は供給され続けることとなり HEAF 火災からの保護は不可となる。

4. HEAF 対策の検討

3. 通常保護の考え方にて検討した通常保護方法と現状での HEAF 火災からの保護可否を表 4-1 の通り纏める。

表4-1 事故点毎における通常保護方法とHEAF火災からの保護可否

事故点	通常保護方法	HEAF火災からの保護可否	課題
1	D/G用過電流保護 51リレーにて保護	○	・なし
2	保護なし	×	・D/G用の過電流保護51リレー動作によるD/G機関の停止インターロックが存在しないため、保護不可。

○：現状の保護構成でHEAF火災から保護可

×：現状の保護構成でHEAF火災から保護不可

表 4-1 に示す通り、事故点 1 における HEAF 火災から保護可能であるが、事故点 2 における HEAF 発生においては、D/G 用の過電流保護 51 リレー動作による D/G 機関の停止インターロックが存在しないため、HEAF 火災から保護は不可となる。

以上の結果により、HEAF 火災からの保護が可能となる対策案を表 4-2 の通り検討した。各対策案の詳細は次の 5.1 項以降に記載する。なお、各対策案の評価については、規格基準の適合性及び改造物量も含めて考慮して総合的に行った。

表4-2 D/G給電中におけるHEAF対策案概要

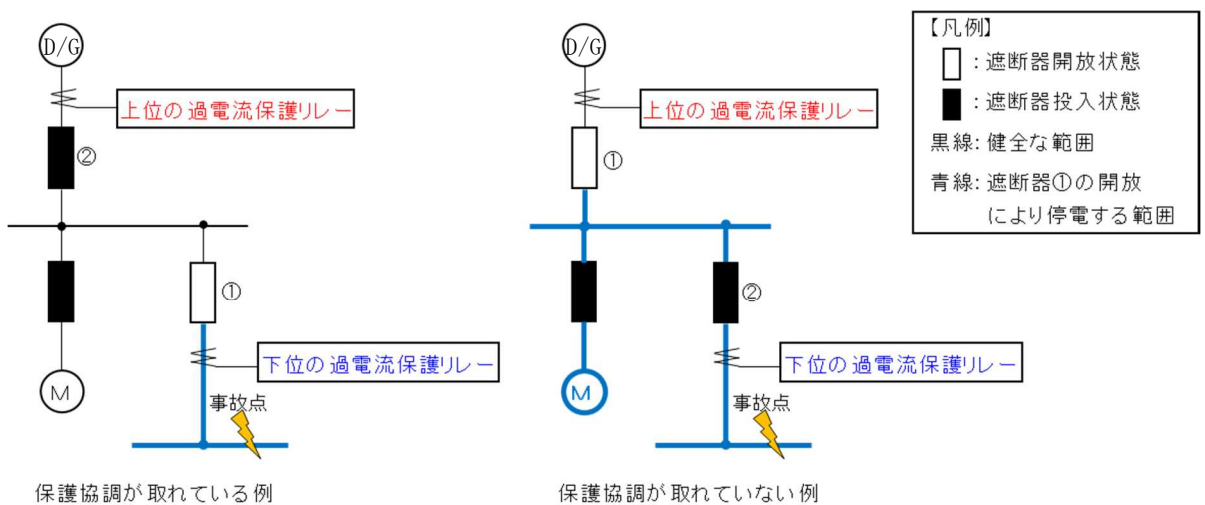
対策案		対策概要	備考
1	D/G 50 要素を重故障として追加	<ul style="list-style-type: none"> ・保護要素に 50(瞬時)要素を追加し, 短絡事故早期検知し, HEAF 火災を抑制 ・重故障扱いとし, 50 動作で D/G の機関停止, D/G 受電遮断器開放 	5.1項
2	D/G 51 要素を重故障に変更	<ul style="list-style-type: none"> ・重故障扱いとし, 51 動作で D/G の機関停止 	5.2項
3	D/G 27 要素を重故障として追加	<ul style="list-style-type: none"> ・保護要素に 27(低電圧)要素を追加し, 短絡事故早期検知し, HEAF 火災を抑制 ・重故障扱いとし, 27 動作で D/G の機関停止, D/G 受電遮断器開放 	5.3項
4	D/G51 要素+限時要素を重故障に変更	<ul style="list-style-type: none"> ・重故障扱いとし, 51 動作+タイマ動作で, D/G の機関停止 ・D/G 受電遮断器の開放後 HEAF 継続の場合, D/G の機関停止 	5.4項

5. HEAF 火災からの保護が可能となる対策案

5.1 対策案 1 : D/G 50 要素を重故障として追加

所内電源盤の過電流リレー(50(瞬時過電流)及び51(限時過電流))は、短絡等の電気事故発生時に遮断器等の開放による事故除去及び事故影響範囲の極小化を図るため、保護協調を考慮した設計としている。

具体的には、事故点に最も近い過電流保護リレーが上位の過電流保護リレーよりも先に動作する設定としている。



※ 数字は遮断器が開放する順番を示す。
但し、①の遮断器開放により、短絡電流が除去された場合、②の遮断器は開放しない。

図 5-1 保護協調のイメージ

D/G の給電回路に設置されている過電流保護リレーの考え方は、補機側の過電流保護リレーが D/G 側の過電流保護リレーよりも先に動作する設定としている。この保護協調が適切でない場合、補機側の電気事故により、D/G 受電遮断器が開放してしまい、D/G からの電源給電が遮断されることとなり、本事象は避ける必要がある。したがって、補機側の短絡事故に対しては、瞬時に動作する 50 保護リレー及び 50 保護リレーよりも時限をもって動作する 51 保護リレーを組合せて適用することで保護協調を実現している。

対策案 1 は、50 保護リレーを追加し、本要素により D/G の機関を停止させることにより、D/G 受電遮断器で HEAF が発生した場合の保護をできるようにするものである。

また、同時に D/G の消磁コンタクトも投入されるインターロックとすることで、D/G 受電遮断器の開放に失敗した場合に D/G の機関停止に併せて D/G の励磁を断ち、より早期な短絡電流の減衰を図る。

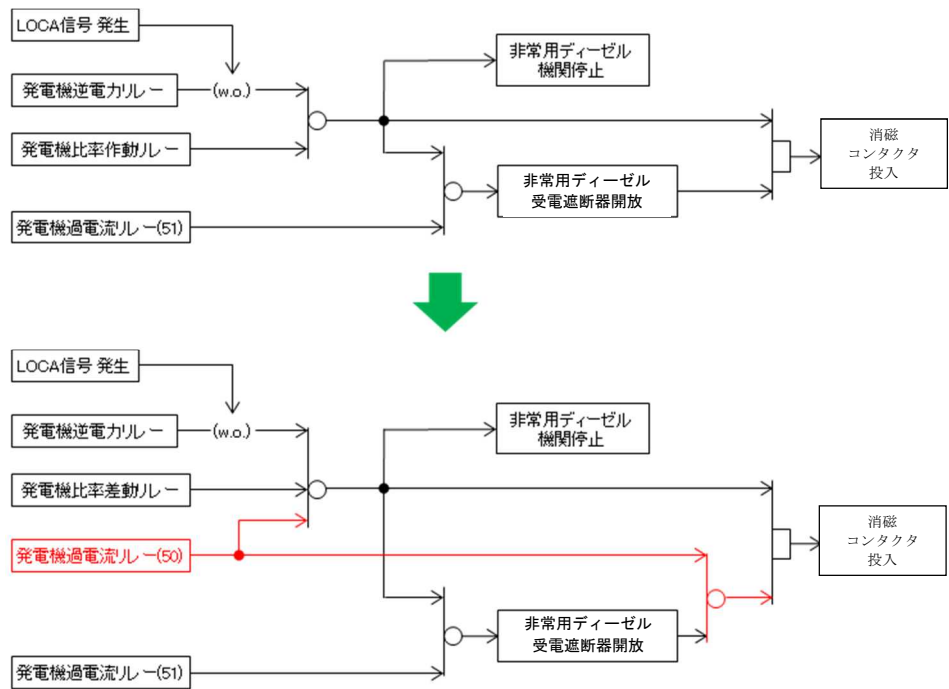


図 5-2 D/G 50 要素を重故障として追加した場合の HEAF 火災からの
保護インターロックイメージ

本対策案は、追加する 50 保護リレーと既存の補機側 50 保護リレーの保護協調について留意する必要がある。

50 保護リレーは設定値以上の電流が流れると瞬時に動作する。

D/G 50 要素を重故障とした場合、保護協調が実現できず補機側の電気事故で D/G が停止してしまうため、適用は困難である。

5.2 対策案2：D/G 51要素を重故障に変更

対策案2は、現状設置されている51保護リレーの動作によりD/Gを停止させることで、HEAF保護を行うものである。

過電流保護51リレーが動作した場合でもD/G機関の停止となるようにインターロックを変更する。(D/G51保護リレー動作を重故障として扱う。)

更に、D/G受電遮断器開放に失敗した場合であっても、D/Gの消磁コンタクトを投入し、D/Gの機関停止と併せてD/Gの励磁を断ち、より早期な短絡電流の減衰を図る。

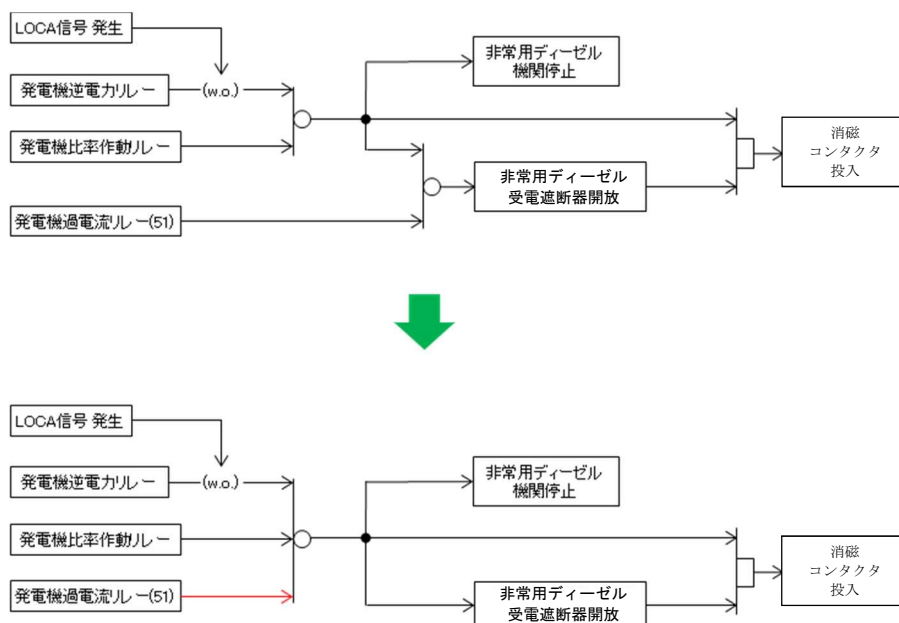


図 5-3 D/G 51 要素を重故障に変更した場合の HEAF 火災からの保護インターロックイメージ

本対策案の特徴として、D/G 内部故障と同様に過負荷(51 保護リレー動作)を重故障とするインターロックを追加することであり、過負荷時に D/G を停止させない設計思想を変更することになることから、事故時対応手順等に対する影響を与えるため、適用は困難である。

5.3 対策案3：D/G 27要素を重故障として追加

対策案3は、D/G 27保護リレー（低電圧）を追加し、本要素を重故障扱いとすることで、短絡時の電圧低下を検出してD/G受電遮断器開放及びD/Gの機関を停止させ、HEAF保護を行うものである。

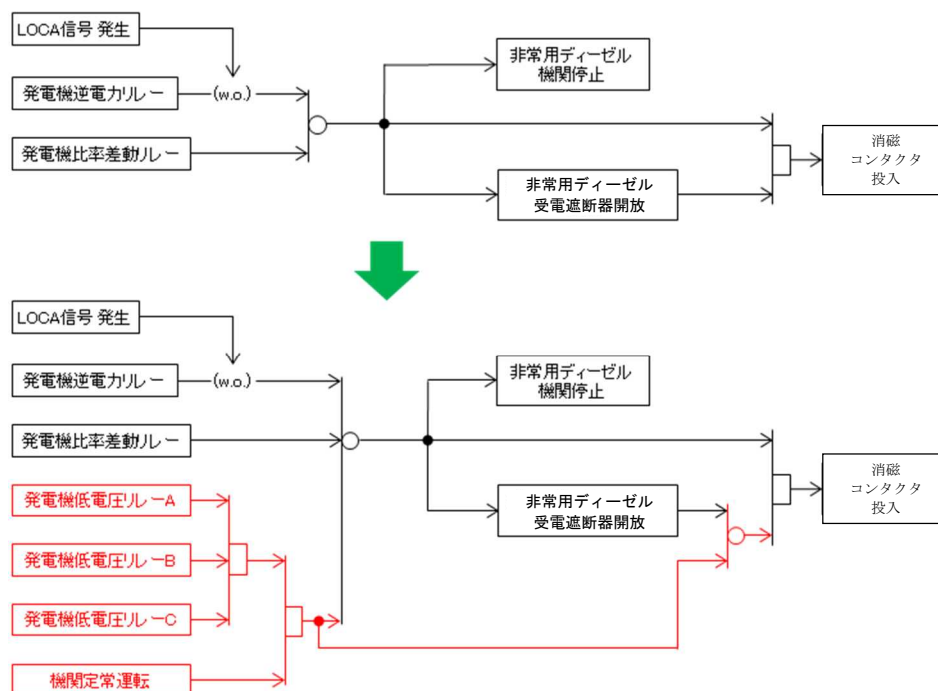


図5-4 D/G 27要素を重故障として追加したD/Gインターロックイメージ

本対策案は、母線などの27保護リレーと使用用途が異なる点について留意する必要がある。例えば、D/G給電時にP/C母線で短絡事故が発生した場合、P/C母線の母線過電流リレーよりも先にD/G 27保護リレーが短絡時の電圧低下を検出し、健全なM/C補機への給電までできなくなることが考えられる。母線27保護リレーでは通常考慮していない過電流保護リレーとの保護協調まで十分検討する必要があることを意味する。

また、D/G給電時での最大負荷投入時における瞬時電圧低下で動作しないよう、動作電圧値についても十分検討する必要がある。

D/G27保護リレー（低電圧）は現状存在せず、追加する必要があるため、適用は困難である。

5.4 対策案4：D/G51 要素+限時要素を重故障に変更

対策案4は、既存の51保護リレーの動作にタイマー動作を追加するものである。

既存の51保護リレー動作は、D/G外部事故(D/G受電遮断器より負荷側での事故)として扱い、51保護リレーが動作した場合、D/G受電遮断器が開放することにより、短絡電流を遮断し、D/Gの機関は停止させないものとしている。そのため、D/G受電遮断器でHEAF発生時、D/Gの機関は停止しないため、D/Gから供給される短絡電流を遮断出来ないこととなる。

そこで、51保護リレーの動作にタイマーの動作を追加し、本要素により51保護リレー動作が一定時間継続した場合には、D/G受電遮断器でHEAFが発生していると捉え、D/Gの機関を停止させることにより、HEAF保護を行う。また、消磁コンタクタ投入信号も発信し、より早期な短絡電流の減衰を図る。

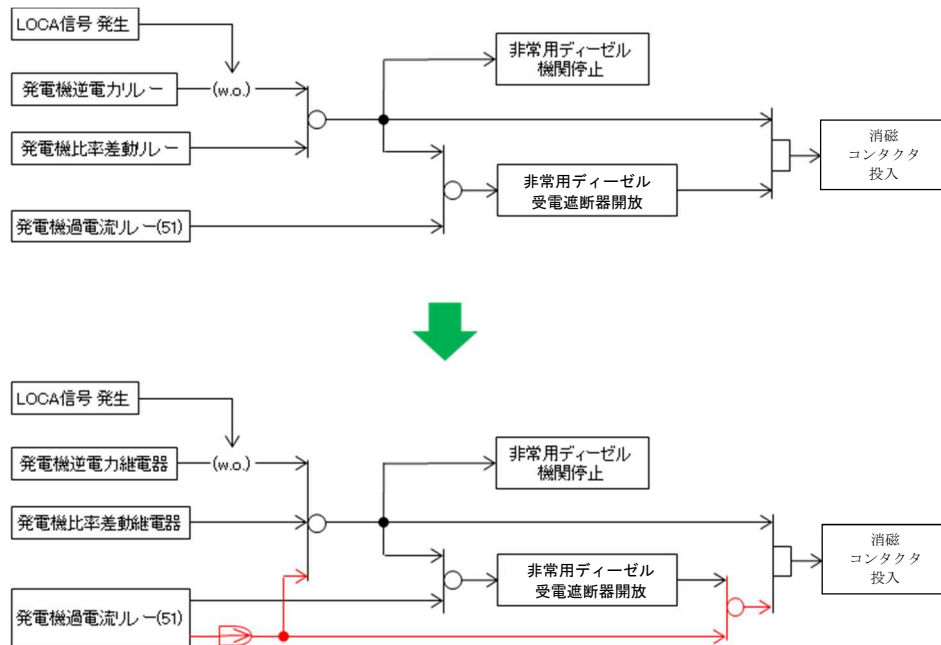


図 5-5 D/G51 要素+限時要素を重故障に変更したD/Gインターロックイメージ

本対策案の特徴として、既存の51保護リレー動作ロジックは変更がないため、51保護リレーが動作し、D/G受電遮断器が開放した場合には、D/Gは停止させないという設計思想を変更することなく対策できるものである。

6. HEAF 対策の検討結果

対策案 1～4 について、従来の設計思想を維持しつつ、HEAF 火災対策が可能である対策案 4（D/G51 動作及びタイマー動作によるトリップ回路（重故障）の追加）を採用する。

対策案 4 で追加するタイマーは、既設設計思想に影響を与えないようにするため、51 保護リレー動作により D/G 受電遮断器が開放し、短絡電流が除去された場合には D/G は停止させず、かつ、HEAF 火災に至る前に D/G 機関停止及び消磁コンタクタ投入が完了するように、時間を設定する必要がある。

タイマー最小設定時間は、51 保護リレー動作により D/G 受電遮断器が開放した場合にはタイマーが動作しないようにするため、補助リレー動作時間、D/G 受電遮断器開放時間、51 保護リレー復帰時間及び補助リレー復帰時間を考慮すると、 sec 以上としなければならない。

また、タイマー最大設定時間は、HEAF 火災に至る前に消磁コンタクタを投入する時間から 51 保護リレー、補助リレー及び消磁コンタクタ等の動作時間を除いた sec 以下としなければならない。

以上より、追加するタイマーの動作時間は、 sec から sec の範囲から sec を選定する。

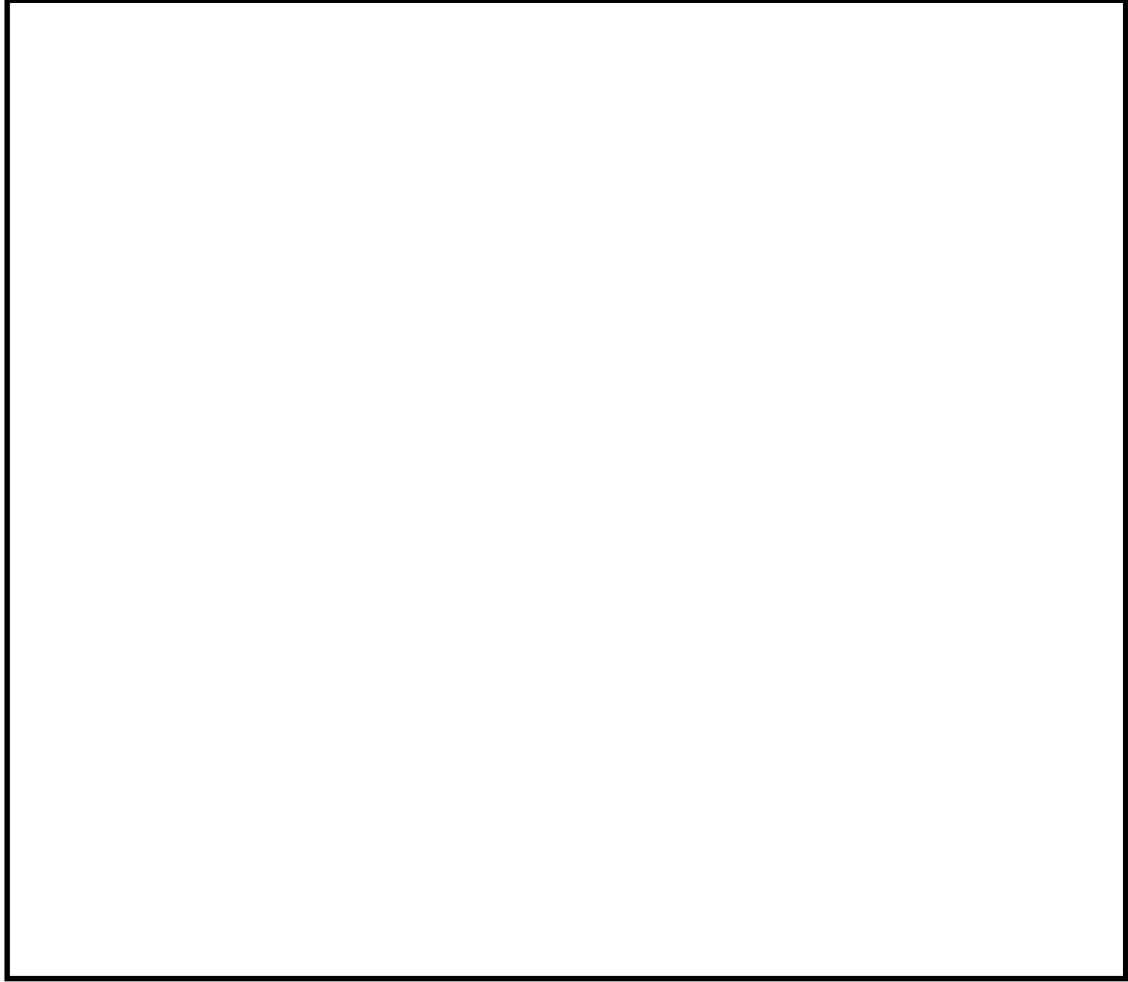


図 6-1 タイマー最小設定時間

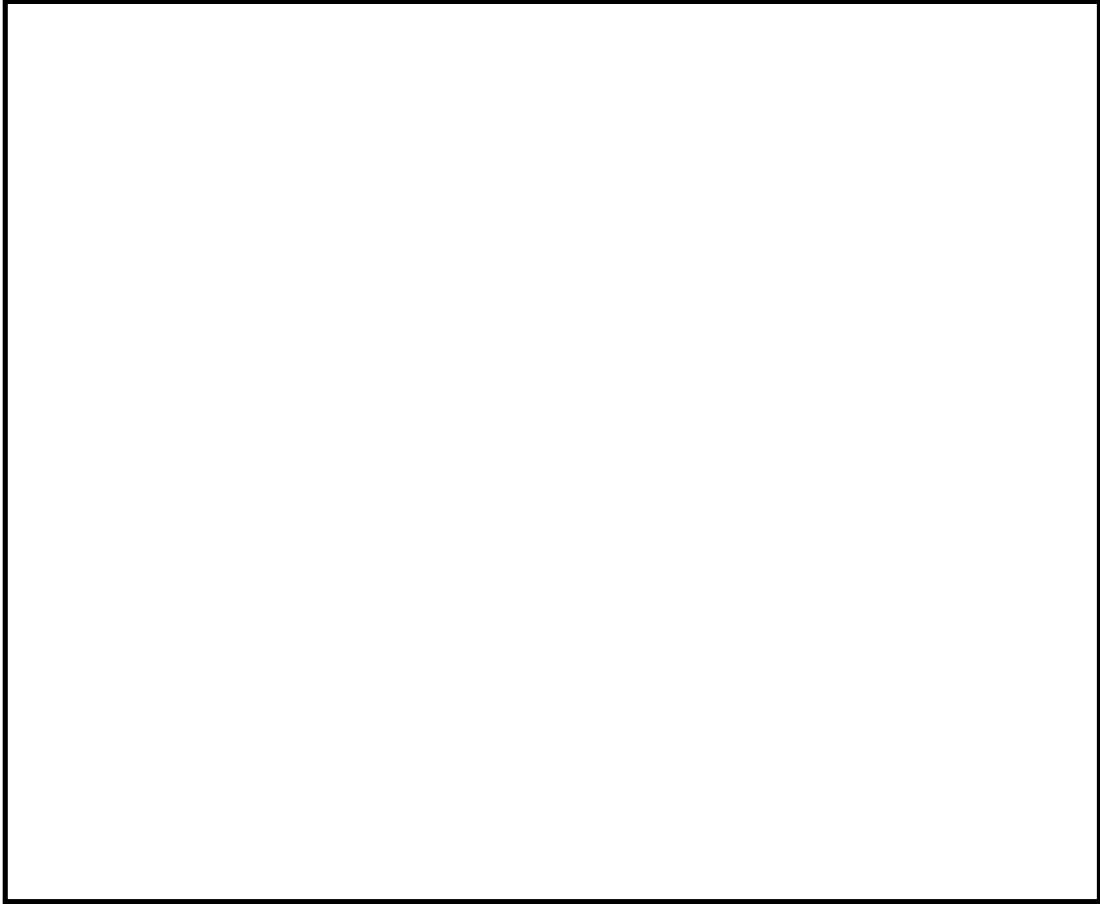


図 6-2 タイマー最大設定時間

原子力情報センター

原子力発電所に関する確率論的安全評価用の
機器故障率の算出
(1982年度～1997年度 16カ年 49基データ 改訂版)

桐本順広^{*1} 松崎 章弘^{*1} 佐々木亨^{*2}

キーワード: 機器故障率
原子力発電所
確率論的安全評価
信頼性

Keywords: Component Failure Rate
Nuclear Power Plant
Probabilistic Safety Analysis (PSA)
Reliability

Estimation of Component Failure Rates for PSA on Nuclear Power Plants 1982 - 1997

by Y.Kirimoto , A.Matsuzaki and A.Sasaki

Abstract

Probabilistic safety assessment (PSA) on nuclear power plants has been studied for many years by the Japanese industry. The PSA methodology has been improved so that PSAs for all commercial LWRs were performed and used to examine for accident management. On the other hand, most data of component failure rates in these PSAs were acquired from U.S. databases. Nuclear Information Center (NIC) of Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) serves utilities by providing safety-, and reliability-related information on operation and maintenance of the nuclear power plants, and by evaluating the plant performance and incident trends.

So, NIC started a research study on estimating the major component failure rates at the request of the utilities in 1988. As a result, we estimated the hourly-failure rates of 47 component types and the demand-failure rates of 15 component types. The set of domestic component reliability data from 1982 to 1991 for 34 LWRs has been evaluated by a group of PSA experts in Japan at the Nuclear Safety Research Association (NSRA) in 1995 and 1996, and the evaluation report was issued in March 1997.

This document describes the revised component failure rate calculated by our re-estimation on 49 Japanese LWRs from 1982 to 1997.

(Nuclear Information Center, Rep.No. P00001)

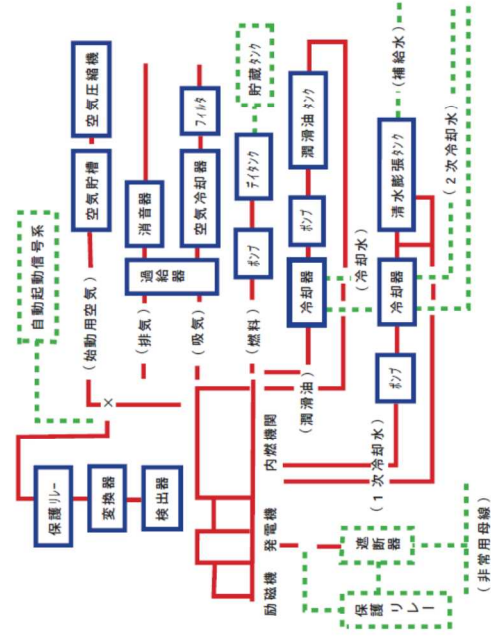
(平成 13年 2月 14日承認)

*1 原子力情報センター 主任研究員

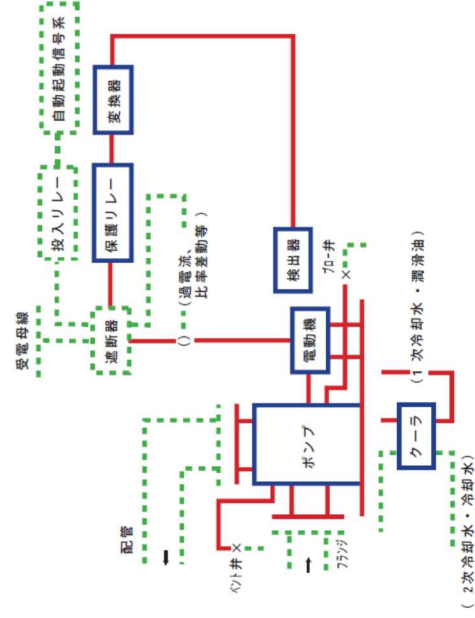
*2 原子力情報センター 研究員

項目	ハウンドリ内	ハウンドリ外
機器本体	ディーゼル機関、発電機、励磁機、その他	-
潤滑油系	潤滑油タンク、冷却器、ポンプ、その他（機関待機時使用のヒーター、ポンプも含む）	-
燃料系	テイトタンク、ポンプ、その他	貯蔵タンク
機器冷却水系	清水膨張タンク、冷却器、ポンプ（機関待機時使用のヒーター、ポンプも含む）	2次冷却水系、補給水系
給排気装置	フィルタ、通給器、消音器、空冷冷却器、その他	-
始動用空気系	空気圧縮機、空気貯槽、電磁弁	-
計測制御装置	冷却水流量、潤滑油圧力、機関速度等に依る検出器・変圧器・保護リレー、その他	電流、電圧に依る検出器・変換器・保護リレー、自動起動信号系
サポート類	支持脚、アンカー等	-
母線・ケーブルとの接続	ケーブル	母線、送電遮断器

項目	ハウンドリ内	ハウンドリ外
機器本体	ポンプ、電動機、カップリング、フランジ、ケーブール、その他	フィルタ、送電遮断器、受電母線
計測制御装置	冷却水流量、潤滑油圧力等に依る検出器・変換器・保護リレー、その他	自動起動信号系、投入リレー、受電遮断計測制御電圧、電流等、電圧、電流等に依る検出器・保護リレー
機器冷却装置	1次冷却水系	2次冷却水系
潤滑油装置	潤滑油系	冷却水系
軸封装置	自給水系	他給水系
サポート類	支持脚、アンカー等	配管のハンカ等
配管・ダクト等の接続	機器側フランジ	配管側フランジ、ハツキン、ボルト、その他
付属弁	熱影響部（機器側） 機器本体に接続されたフロー弁、ベント弁等、及びそこまでの管路配管	溶接部及び熱影響部



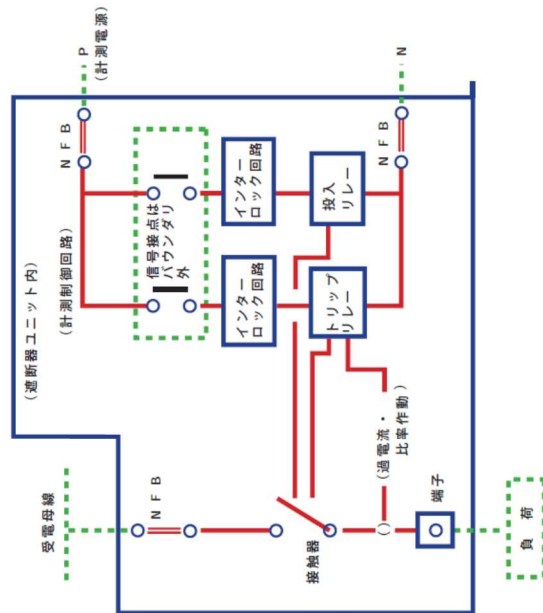
1. 非常用ディーゼル発電機



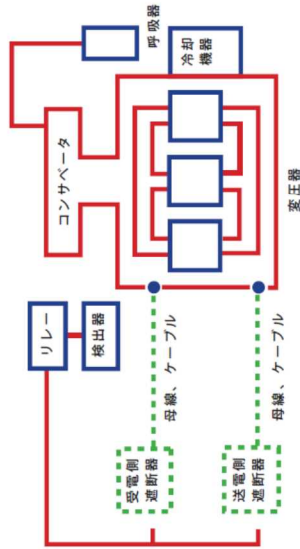
2. 電動ポンプ

項目	ハウンドリ内	ハウンドリ外
機器本体	遮断器機構部、接触器、投入及びトリップ回路のリレー、インターロック回路(信号接点を除く)	投入及びトリップ回路の信号接点
計測制御装置	負荷電流・電圧・位相に係わる検出器・変換器・保護リレー	警報、指示用検出器
サポート類	支持脚、アンカー等	-
母線・ケーブルとの接続部	接続部	ケーブル、母線

項目	ハウンドリ内	ハウンドリ外
機器本体	タンク、巻線、タップリード線、負荷時タップ切替装置(タップ選択器、切替閉閉器)、冷却機器、その他	-
計測制御装置	電流・電圧に係わる検出器・保護リレー、機械的(温度・圧力)検出器・保護リレー	受電・送電開運計測制御(電圧・電流等)
サポート類	支持脚、アンカー等	-
母線・ケーブルとの接続部	接続部	ケーブル、母線、遮断器



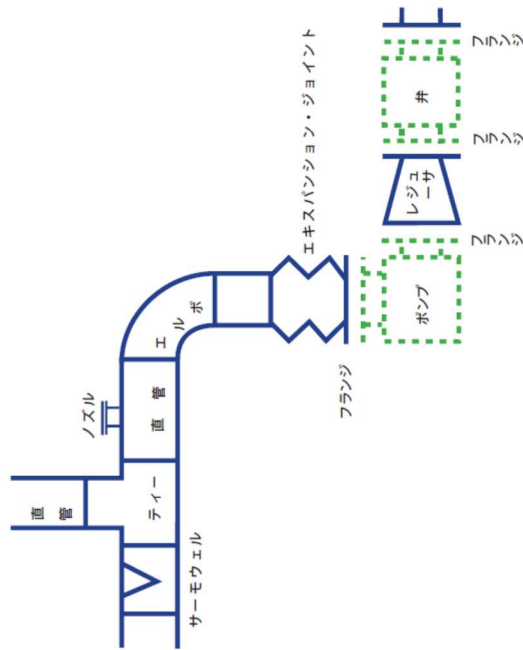
23. 遮断器



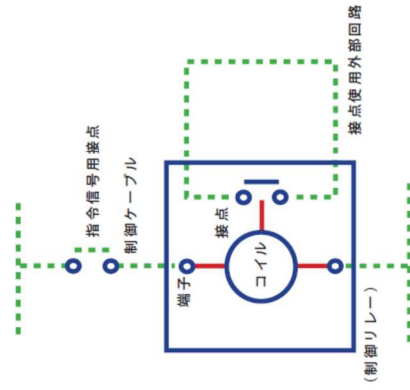
24. 変圧器

項目	ハウンドリ内	ハウンドリ外
機器本体	直管、エルボ、テイ、レジェーサ、サーモウェル、ノズル、エキスパンション・ジョイント、その他	オリフィス、ベネトレーション
サポート類	-	ハンガ、サポート、メカスナアンカー等
機器との接続	配管側フランジ、バッキン、ボルト、その他	機器側フランジ
	溶接部	熱影響部(機器側)

項目	ハウンドリ内	ハウンドリ外
機器本体	リレー本体 (コイル、接点、構造材)	制御電源、信号指令接点(スイッチ接点等)、外部回路
機器との接続	制御ケーブル	制御ケーブル
	との接続	



29. 配管



30. リレー

故障件数の不確実さを考慮した 国内一般機器故障率の推定

(1982年度～2010年度 29ヵ年 56基データ)

2016年6月

一般社団法人 原子力安全推進協会

表 A-1 (1/3) 国内一般時間故障率比較表

機種	故障モード	29ヵ年データ (本報告書推定結果)			平均値比			EF比			21ヵ年データ報告書			26ヵ年データ報告書				
		観測され た故障件 数[件]	延べ運転 時間[h]	平均値*1 [1/h]	29ヵ年 /21ヵ年	29ヵ年 /26ヵ年	29ヵ年 /26ヵ年	EF ³	平均値 ² [1/h]	延べ運転 時間[h]	観測され た故障件 数[件]	平均値 [1/h]	EF ⁴ (近似)	観測され た故障件 数[件]	延べ運転 時間[h]	平均値 [1/h]	EF ⁴ (近似)	
非常用ディーゼル発電機	起動失敗	55	1.9E+07	4.0E-06	7.0E-06	2.0	176%	103%	31%	78%	19	1.3E+07	4.3E-06	6.5	46	1.6E+07	7.3E-06	2.5
	継続運転転失敗(24時間平均) ^{4,5}	-	-	3.3E-04	1.7	350%	143%	77%	88%	-	-	-	9.5E-05	2.2	-	-	2.3E-04	1.7
	継続運転転失敗(72時間平均) ^{4,5}	-	-	2.9E-04	1.8	-	147%	-	88%	-	-	-	-	-	-	-	1.9E-04	1.8
	継続運転転失敗	-	-	2.2E-04	2.0	-	156%	-	99%	-	-	-	-	-	-	-	1.4E-04	2.0
	電動ポンプ(非常用待機、海水)	5	9.0E+07	1.3E-06	2.0E-07	2.2	146%	89%	13%	22%	23	6.2E+07	1.3E-07	17.3	4	8.0E+07	2.2E-07	10.2
	電動ポンプ(常用運転、海水)	33	1.1E+08	3.9E-06	8.1E-07	2.5	76%	97%	21%	38%	24	7.7E+07	1.1E-06	11.8	29	9.8E+07	8.4E-07	6.5
	電動ポンプ(非常用待機、海水)	3	5.3E+07	1.9E-06	2.4E-07	2.3	95%	127%	12%	22%	2	3.7E+07	2.6E-07	19.2	2	4.7E+07	1.9E-07	10.7
	電動ポンプ(非常用待機、海水)	2	2.6E+07	1.9E-06	3.7E-07	2.6	130%	103%	16%	32%	1	1.8E+07	2.8E-07	16.4	1	2.3E+07	3.5E-07	8.3
	電動ポンプ(非常用待機、海水)	2	1.6E+07	3.9E-06	6.0E-07	2.5	78%	82%	9%	21%	2	9.7E+06	7.7E-07	27.3	2	1.4E+07	7.4E-07	11.9
	電動ポンプ(非常用待機、海水)	1	3.9E+06	1.9E-06	1.1E-06	3.4	72%	14%	13%	7%	1	3.1E+06	1.6E-06	27.4	1	3.6E+06	7.8E-06	51.3
タービン駆動ポンプ	起動失敗	29	9.7E+06	9.0E-06	7.5E-06	2.3	185%	83%	5%	27%	6	6.8E+06	4.1E-06	47.3	22	8.7E+06	9.1E-06	8.6
	継続運転転失敗	12	1.2E+07	1.9E-03	4.0E-06	1.9	136%	138%	43%	42%	8	7.5E+06	2.9E-06	4.3	10	1.0E+07	2.9E-06	4.5
	起動失敗 ^{4,5}	4	1.8E+05	7.1E-06	4.2E-05	2.8	92%	77%	64%	81%	2	1.3E+05	4.9E-05	4.3	3	1.7E+05	5.4E-05	3.4
	継続運転転失敗 ⁷	-	-	1.2E-03	30.0	45%	56%	100%	100%	100%	-	-	2.6E-03	30.0	-	-	2.1E-03	30.0
	電動ポンプ(海水)	31	1.3E+09	1.3E-06	6.6E-08	5.9	137%	57%	10%	21%	9	9.1E+08	4.8E-08	60.0	25	1.2E+09	1.2E-07	27.6
	制御又は制御	0	1.3E+09	3.4E-08	4.2E-09	2.9	166%	139%	31%	51%	0	9.1E+08	2.5E-09	9.4	0	1.2E+09	3.1E-09	5.7
	閉塞	2	1.3E+09	1.9E-06	1.3E-08	2.1	138%	162%	13%	23%	2	9.1E+08	9.7E-09	15.8	2	1.2E+09	8.3E-09	8.9
	外部リーク	1	1.3E+09	3.9E-08	5.9E-09	2.7	216%	74%	29%	37%	0	9.1E+08	2.5E-09	9.4	1	1.2E+09	7.4E-09	7.3
	内部リーク	2	1.3E+09	1.0E-07	8.7E-09	2.4	209%	112%	18%	26%	1	9.1E+08	4.1E-09	13.3	2	1.2E+09	7.7E-09	9.2
	作動失敗	3	4.9E+07	1.3E-06	2.9E-07	2.4	306%	25%	32%	11%	0	3.4E+07	8.0E-08	7.6	2	4.4E+07	9.9E-07	22.4
電動ポンプ(海水)	制御又は制御	0	4.9E+07	3.4E-08	2.9E-08	4.6	34%	45%	61%	46%	0	3.4E+07	8.0E-08	7.6	0	4.4E+07	6.4E-08	10.1
	閉塞	0	4.9E+07	1.9E-06	1.4E-07	2.7	173%	215%	36%	27%	0	3.4E+07	8.0E-08	7.6	0	4.4E+07	6.4E-08	10.1
	外部リーク	0	4.9E+07	3.3E-08	2.7E-08	4.7	34%	42%	62%	46%	0	3.4E+07	8.0E-08	7.6	0	4.4E+07	6.4E-08	10.1
	内部リーク	0	4.9E+07	1.0E-07	4.9E-08	3.8	61%	70%	51%	38%	0	3.4E+07	8.0E-08	7.6	0	4.4E+07	6.4E-08	10.1
	作動失敗	21	7.2E+08	1.9E-06	8.9E-08	1.9	79%	94%	30%	47%	18	4.9E+08	1.1E-07	6.3	21	6.3E+08	9.1E-08	4.0
	制御又は制御	3	7.2E+08	1.3E-07	1.8E-08	2.6	67%	59%	7%	17%	3	4.9E+08	2.7E-08	37.1	3	6.3E+08	3.0E-08	15.2
	閉塞	1	7.2E+08	1.9E-06	2.0E-08	2.2	191%	192%	10%	35%	1	4.9E+08	1.0E-08	21.8	1	6.3E+08	1.0E-08	6.4
	外部リーク	1	7.2E+08	5.5E-08	1.0E-08	2.8	95%	96%	13%	43%	1	4.9E+08	1.0E-08	21.8	1	6.3E+08	1.0E-08	6.4
	内部リーク	3	7.2E+08	9.7E-08	1.7E-08	2.9	86%	43%	7%	13%	2	4.9E+08	2.0E-08	39.1	3	6.3E+08	4.0E-08	21.4
	作動失敗	16	1.4E+08	1.7E-06	3.2E-07	2.8	71%	68%	16%	21%	12	1.0E+08	4.5E-07	17.3	15	1.3E+08	4.7E-07	12.9
油圧作動弁	制御又は制御	4	1.4E+08	2.0E-07	8.9E-08	2.5	78%	74%	14%	19%	3	1.0E+08	1.1E-07	17.6	3	1.3E+08	1.2E-07	13.2
	閉塞	0	1.4E+08	1.9E-06	6.2E-08	2.5	285%	215%	25%	40%	0	1.0E+08	2.2E-08	10.1	0	1.3E+08	2.9E-08	6.3
	外部リーク	1	1.4E+08	2.2E-07	4.7E-08	2.8	217%	164%	28%	45%	0	1.0E+08	2.2E-08	10.1	0	1.3E+08	2.9E-08	6.3
	内部リーク	0	1.4E+08	2.9E-08	1.5E-08	3.9	71%	54%	39%	63%	0	1.0E+08	2.2E-08	10.1	0	1.3E+08	2.9E-08	6.3
	閉塞	3	9.5E+08	1.9E-08	9.4E-09	2.7	132%	45%	16%	23%	1	6.5E+08	7.1E-09	16.8	3	8.4E+08	2.1E-08	11.9
	閉塞	17	9.5E+08	3.9E-07	6.7E-08	14.5	196%	29%	42%	16%	4	6.5E+08	2.8E-08	34.4	13	8.4E+08	2.4E-07	90.0
	外部リーク	0	9.5E+08	1.1E-08	3.4E-09	3.5	123%	68%	32%	52%	0	6.5E+08	2.8E-09	10.7	0	8.4E+08	5.0E-09	6.6
	内部リーク	5	9.5E+08	3.1E-07	2.1E-08	2.3	293%	23%	14%	6%	1	6.5E+08	7.1E-09	16.8	4	8.4E+08	9.0E-08	37.3
	閉塞	6	2.1E+09	2.7E-07	1.1E-08	2.0	132%	146%	12%	25%	3	1.5E+09	8.3E-09	16.4	4	1.9E+09	7.5E-09	8.1
	閉塞	4	2.1E+09	1.9E-06	1.1E-08	2.0	127%	136%	7%	18%	4	1.5E+09	8.5E-09	27.0	4	1.9E+09	8.0E-09	11.3
安全弁	外部リーク	0	2.1E+09	2.9E-07	4.8E-09	2.4	279%	209%	20%	50%	0	1.5E+09	3.7E-09	12.2	0	1.9E+09	2.9E-09	4.7
	内部リーク	1	2.1E+09	1.3E-07	5.1E-09	2.4	138%	162%	14%	41%	1	1.5E+09	3.7E-09	12.2	1	1.9E+09	3.2E-09	5.8
	閉塞	0	2.5E+08	5.9E-07	3.1E-08	2.6	219%	162%	32%	51%	0	1.7E+08	1.4E-08	8.3	0	2.2E+08	1.9E-08	6.2
	閉塞	1	2.5E+08	2.9E-07	3.3E-08	2.6	232%	113%	32%	42%	0	1.7E+08	1.4E-08	8.3	1	2.2E+08	2.9E-08	6.2
	閉塞	0	2.5E+08	7.0E-08	1.6E-08	3.2	116%	86%	39%	63%	0	1.7E+08	1.4E-08	8.3	0	2.2E+08	1.9E-08	5.1
	外部リーク	0	2.5E+08	2.8E-08	1.1E-08	3.7	80%	60%	44%	72%	0	1.7E+08	1.4E-08	8.3	0	2.2E+08	1.9E-08	5.1
	内部リーク	5	2.5E+08	9.0E-08	5.7E-08	2.6	264%	46%	13%	18%	1	1.7E+08	2.2E-08	20.8	4	2.2E+08	1.2E-07	14.7

表 A-1 (2/3) 国内一般時間故障率比較表

機種	故障モード	29年データ (本報告書発表結果)				平均値比		EF比		21年データ報告書			26年データ報告書		
		観測された故障件数(件)	延べ運転時間[h]	平均値 ²⁾ [1/h]	EF ³⁾	29年/21年	29年/26年	観測された故障件数(件)	延べ運転時間[h]	平均値	EF ⁴⁾ (近似)	観測された故障件数(件)	延べ運転時間[h]	平均値	EF ⁴⁾ (近似)
遠がし安全井 (DR)	閉鎖失敗	0	5.4E+07	3.9E-06	1.6E-07	2.6	279%	153%	16%	24%	0	4.8E+07	1.0E-07	10.7	
	閉鎖失敗	0	5.4E+07	1.2E-06	1.1E-07	3.4	206%	113%	18%	26%	0	4.8E+07	1.0E-07	10.7	
	閉鎖	0	5.4E+07	2.4E-07	6.8E-08	2.8	122%	67%	21%	31%	0	4.8E+07	1.0E-07	10.7	
	外部リーク	0	5.4E+07	2.4E-08	2.5E-08	4.9	39%	21%	31%	46%	0	4.8E+07	1.0E-07	10.7	
	内部リーク	0	5.4E+07	4.2E-07	8.3E-08	3.1	148%	81%	28%	29%	0	4.8E+07	1.0E-07	10.7	
真空度がし井 (DR)	作動失敗	0	3.1E+07	7.7E-06	2.9E-07	2.7	353%	36%	19%	16%	0	2.8E+07	8.1E-07	16.7	
	電機弁	7	1.8E+09	1.7E-06	1.6E-08	2.0	102%	101%	12%	15%	6	1.6E+09	1.6E-08	13.1	
	閉鎖又は閉閉	1	1.8E+09	3.4E-08	4.4E-09	2.7	123%	107%	12%	39%	1	1.3E+09	3.6E-09	21.4	
	閉塞	0	1.8E+09	3.4E-08	5.1E-09	2.6	249%	192%	29%	49%	0	1.6E+09	4.1E-09	6.9	
	外部リーク	1	1.8E+09	3.4E-08	4.4E-09	2.6	109%	123%	22%	43%	1	1.6E+09	3.6E-09	6.1	
ファン/ブロー	内部リーク	1	1.8E+09	1.8E-07	6.2E-09	2.3	154%	173%	19%	38%	1	1.6E+09	3.6E-09	6.1	
	作動失敗	8	8.8E+07	9.9E-07	1.9E-07	2.7	116%	116%	16%	31%	1	3.4E+07	1.3E-07	16.5	
	継続運転失敗 ¹⁾ (異常時)	0	-	-	-	2.2	53%	37%	7%	7%	7	6.0E+07	6.0E-07	31.2	
	作動失敗	7	5.7E+08	8.1E-07	4.6E-08	2.3	423%	27%	17%	10%	1	3.9E+08	1.1E-08	13.3	
	閉鎖又は閉閉	0	5.7E+08	6.1E-07	1.7E-08	2.5	299%	210%	28%	45%	0	3.9E+08	5.5E-09	8.7	
タンバ	閉塞	1	5.7E+08	1.9E-06	2.4E-08	2.2	439%	144%	26%	30%	0	3.9E+08	5.5E-09	8.7	
	外部リーク	0	5.7E+08	2.9E-07	1.4E-08	2.6	253%	177%	30%	48%	0	3.9E+08	5.5E-09	8.7	
	内部リーク	0	5.7E+08	1.4E-07	1.2E-08	2.8	209%	147%	32%	51%	0	3.9E+08	5.5E-09	8.7	
	伝熱管破損	1	2.3E+08	3.8E-07	3.7E-08	2.6	145%	134%	21%	39%	1	1.6E+08	2.6E-08	12.3	
	外部リーク	0	2.3E+08	3.3E-07	2.8E-08	2.7	318%	115%	15%	15%	0	2.1E+08	2.4E-08	5.2	
タンク	伝熱管閉塞	3	2.3E+08	1.9E-06	6.8E-08	2.3	97%	107%	8%	15%	2	1.6E+08	7.1E-08	29.3	
	破損	0	9.8E+07	3.3E-07	5.2E-08	3.0	163%	102%	24%	61%	0	8.5E+07	5.1E-08	4.9	
	閉塞	0	9.8E+07	1.9E-06	8.4E-08	2.6	263%	165%	21%	53%	0	8.5E+07	5.1E-08	4.9	
	外部リーク	1	8.0E+08	2.9E-07	1.3E-08	2.4	417%	151%	20%	40%	0	5.4E+08	3.2E-09	12.2	
	内部破損	2	8.0E+08	1.0E-06	2.0E-08	2.5	618%	309%	21%	54%	0	5.4E+08	3.2E-09	12.2	
ストレナ/フィルタ	閉塞	1	2.8E+08	8.6E-07	3.0E-08	2.4	388%	151%	20%	40%	0	1.9E+08	9.9E-09	12.0	
	外部リーク	0	2.8E+08	2.8E-07	2.4E-08	2.7	239%	133%	23%	57%	0	1.9E+08	9.9E-09	12.0	
	内部破損	0	2.8E+08	2.3E-07	2.2E-08	2.8	227%	127%	23%	58%	0	1.9E+08	9.9E-09	12.0	
	閉塞	1	3.9E+07	8.6E-07	1.9E-07	2.8	195%	152%	22%	38%	0	2.4E+07	9.5E-08	13.1	
	外部リーク	1	3.9E+07	2.8E-07	1.3E-07	3.2	138%	79%	24%	31%	0	2.4E+07	9.5E-08	13.1	
制御用駆動装置 ¹⁾ (DR)	閉塞	2	3.9E+07	2.3E-06	2.8E-07	2.5	104%	80%	13%	19%	2	2.4E+07	2.8E-07	19.5	
	導入失敗	6	6.9E+08	9.9E-08	3.0E-08	4.8	455%	17%	35%	7%	0	4.4E+08	6.5E-09	13.9	
	制御用駆動装置(DR)	1	1.7E+08	9.9E-08	3.0E-08	3.1	204%	18%	19%	19%	9	1.2E+08	1.6E-08	16.3	
	PLR ML セット (DR ¹⁾ , ⁵⁾	15	6.6E+06	2.1E-06	5.2E-06	2.0	62%	68%	33%	44%	13	5.1E+06	8.4E-06	6.2	
	RFI, CROM Me-セット	0	1.9E+07	2.1E-06	2.8E-07	2.9	176%	126%	28%	29%	0	1.3E+07	1.6E-07	10.5	
インバータ (PLR)	閉塞	5	3.3E+06	5.6E-06	4.6E-06	2.8	13%	15%	12%	12%	2	6.7E+05	3.4E-05	23.6	
	閉塞	1	3.9E+07	5.6E-06	3.3E-07	2.5	87%	104%	16%	18%	1	1.9E+07	3.8E-07	15.6	
	作動失敗	13	1.0E+09	3.3E-06	4.3E-07	2.1	89%	49%	8%	10%	9	7.1E+08	4.8E-08	25.2	
	閉塞	14	1.0E+09	2.1E-07	3.3E-08	2.0	82%	85%	37%	33%	12	7.1E+08	4.7E-08	5.5	
	閉塞	2	1.0E+09	2.1E-07	1.2E-08	2.3	137%	119%	13%	20%	1	7.1E+08	8.7E-09	17.9	
変圧器	閉塞	6	9.2E+07	9.4E-07	2.1E-07	2.2	81%	68%	18%	21%	5	6.2E+07	1.1E-07	11.9	
	閉塞	0	9.2E+07	5.9E-07	9.9E-08	3.0	166%	148%	30%	30%	0	3.4E+07	5.7E-08	10.1	
	閉塞	3	5.2E+07	2.7E-06	2.6E-07	2.3	200%	79%	14%	10%	1	3.4E+07	1.3E-07	16.0	
	閉塞	5	2.2E+10	1.4E-06	4.1E-08	2.0	131%	108%	11%	19%	3	3.6E+08	1.3E-08	17.9	
	短絡	0	2.2E+10	2.1E-08	4.4E-10	2.4	334%	236%	24%	40%	0	1.5E+10	1.3E-10	10.2	
制御ケーブル ²⁾	絶縁	3	2.2E+10	2.1E-07	9.6E-10	2.0	354%	139%	12%	17%	1	1.5E+10	2.7E-10	16.2	
	絶縁	3	2.2E+10	2.1E-07	9.6E-10	2.0	126%	130%	12%	17%	3	1.5E+10	7.6E-10	16.0	
	断線	0	2.2E+10	2.1E-07	9.6E-10	2.0	126%	130%	12%	17%	3	1.5E+10	7.6E-10	16.0	

表 A-1 (3/3) 国内一般時間故障率比較表

機種	故障モード	29ヵ年データ (本報告書推定結果)		平均値比		日比		21ヵ年データ報告書		26ヵ年データ報告書					
		故障発生数 [1/年]	平均値 ²⁾ [1/年]	29ヵ年 /26ヵ年	29ヵ年 /21ヵ年	故障発生数 [1/年]	平均値 [1/年]	故障発生数 [1/年]	平均値 [1/年]	故障発生数 [1/年]	平均値 [1/年]				
配置 3インチ未満 ¹⁾	リーク	0	5.4E+09	6.9E-10	3.9E-10	4.0	59%	44%	34%	84%	0	4.7E+09	8.8E-10	4.8	
	閉塞	1	5.4E+09	1.9E-07	2.5E-09	2.2	385%	161%	35%	1	4.7E+09	6.6E-10	11.7	6.4	
配置 3インチ以上 ¹⁾	リーク	4	1.2E+10	6.9E-10	8.1E-10	2.8	80%	52%	15%	27%	2	8.3E+09	1.0E-09	18.5	10.3
	閉塞	0	1.2E+10	1.9E-08	7.0E-10	2.5	221%	188%	29%	48%	0	8.3E+09	3.2E-10	8.6	5.1
リレー	不動作	8	1.3E+10	3.4E-08	2.9E-09	3.1	143%	31%	7%	6%	3	8.1E+09	1.5E-09	45.4	50.9
	短絡	9	1.3E+10	8.4E-07	3.6E-09	1.9	102%	52%	7%	4	8.1E+09	3.0E-09	34.4	28.8	
運送リレー	不動作	0	9.9E+08	6.9E-08	6.9E-09	2.8	145%	146%	36%	41%	0	6.9E+08	4.7E-09	7.8	6.8
	短絡	0	9.9E+08	8.4E-08	6.9E-09	2.8	145%	146%	36%	41%	0	6.9E+08	4.7E-09	7.8	6.8
演算器	不動作	0	6.3E+08	8.4E-07	1.9E-08	2.4	282%	216%	28%	46%	0	4.4E+08	5.8E-09	8.7	5.2
	高出力/低出力	8	6.3E+08	8.4E-07	4.9E-08	2.6	214%	132%	18%	30%	3	4.4E+08	2.1E-08	14.5	8.6
カード	不動作	0	3.6E+08	8.4E-07	2.9E-08	2.6	383%	84%	10%	12%	0	2.4E+08	6.6E-09	25.7	21.5
	高出力/低出力	6	3.6E+08	8.4E-07	5.0E-08	2.4	54%	9%	9%	5%	4	2.4E+08	9.2E-09	25.4	21.5
警報装置	不動作	0	1.9E+09	8.4E-08	4.2E-09	2.6	189%	216%	20%	33%	0	1.3E+09	2.3E-09	12.7	7.8
	高出力/低出力	3	1.9E+09	8.4E-07	1.0E-08	2.1	107%	66%	11%	10%	3	1.3E+09	9.5E-09	18.6	21.8
ヒューズ	不動作	3	3.9E+09	2.1E-06	6.9E-09	2.0	118%	141%	11%	17%	3	2.4E+09	5.5E-09	18.2	11.8
	断断線	7	8.7E+08	1.2E-06	3.1E-08	2.2	411%	51%	13%	1%	7	5.9E+08	7.6E-09	16.8	33.0
流量トランスミッタ	不動作	21	8.7E+08	8.4E-07	7.2E-08	5.5	359%	35%	45%	13%	4	5.9E+08	2.0E-08	12.2	42.4
	高出力/低出力	1	1.1E+09	9.9E-07	1.3E-08	2.2	435%	84%	21%	22%	0	7.5E+08	2.9E-09	10.9	8.5
圧力トランスミッタ	不動作	15	1.1E+09	1.2E-06	2.7E-08	1.9	118%	86%	22%	31%	8	7.5E+08	3.5E-08	8.5	10.4
	高出力/低出力	1	4.5E+08	8.4E-07	3.0E-08	2.2	138%	140%	13%	24%	2	3.0E+08	2.2E-08	16.7	9.4
水位トランスミッタ	不動作	2	4.5E+08	1.4E-07	4.1E-09	2.3	389%	28%	22%	38%	0	2.0E+09	1.1E-09	10.6	6.1
	高出力/低出力	5	2.9E+09	8.4E-07	8.5E-09	2.0	68%	73%	9%	10%	5	2.0E+09	1.3E-08	23.7	20.2
温度検出器	不動作	0	8.3E+07	8.4E-07	7.9E-08	2.8	276%	137%	23%	54%	0	5.6E+07	3.4E-08	12.2	5.2
	高出力/低出力	4	8.3E+07	8.4E-07	1.7E-07	2.6	239%	78%	12%	30%	1	5.6E+07	7.3E-08	21.8	8.7
放射線検出器	不動作	0	5.3E+08	8.4E-07	1.9E-08	2.4	268%	20%	24%	44%	0	3.6E+08	7.1E-09	9.5	5.6
	高出力/低出力	2	5.3E+08	8.4E-07	2.7E-08	2.3	379%	185%	24%	29%	0	3.6E+08	7.1E-09	9.5	7.9
流量スイッチ	不動作	1	1.4E+09	2.2E-07	7.9E-09	2.4	157%	165%	17%	33%	1	9.9E+08	5.0E-09	13.9	7.2
	高出力/低出力	7	1.0E+09	8.4E-07	1.9E-08	2.5	93%	61%	6%	6%	6	9.9E+08	2.0E-08	45.0	29.7
水位スイッチ	不動作	2	1.0E+09	8.4E-07	2.7E-08	2.5	332%	55%	17%	6%	1	7.1E+08	8.2E-09	14.8	43.0
	高出力/低出力	2	1.0E+09	8.4E-07	1.5E-08	2.3	170%	92%	5%	13%	2	7.1E+08	9.0E-09	44.9	17.1
温度スイッチ	不動作	0	4.9E+08	7.9E-07	1.9E-08	2.5	168%	141%	25%	42%	0	3.4E+08	1.1E-08	9.9	5.9
	高出力/低出力	2	4.9E+08	8.4E-07	2.8E-08	2.4	111%	113%	6%	18%	2	3.4E+08	2.5E-08	37.9	13.4
リミットスイッチ	不動作	2	3.2E+09	8.4E-07	9.2E-09	2.0	169%	84%	12%	20%	3	2.2E+09	5.5E-09	16.3	9.9
	高出力/低出力	2	3.2E+09	8.4E-07	5.9E-09	2.1	181%	258%	14%	26%	2	2.2E+09	3.1E-09	15.1	8.1
手動スイッチ	不動作	2	5.1E+09	1.8E-07	3.1E-09	2.2	169%	162%	16%	30%	2	3.5E+09	1.9E-09	13.5	7.3
	高出力/低出力	1	5.1E+09	8.4E-08	2.4E-09	2.4	272%	227%	27%	45%	0	3.5E+09	1.1E-09	8.8	5.3
コントローラ	不動作	1	6.2E+08	8.4E-07	2.0E-08	2.3	499%	354%	17%	28%	0	4.3E+08	4.0E-09	13.3	8.1
	高出力/低出力	4	6.2E+08	8.4E-07	3.1E-08	2.3	212%	96%	12%	13%	1	4.3E+08	1.4E-08	20.1	17.2
配線/電線	短絡 ⁷⁾	-	-	-	3.3E-09	30.0	1043%	515%	100%	100%	-	-	3.1E-10	30.0	
	断線 ⁷⁾	-	-	-	7.4E-09	30.0	1254%	408%	100%	100%	-	-	5.9E-10	30.0	
ヒューズ	断線 ⁷⁾	-	-	-	7.4E-09	30.0	346%	408%	100%	100%	-	-	2.1E-09	30.0	
	機能喪失 ⁷⁾	-	-	-	5.0E-08	30.0	383%	424%	100%	100%	-	-	1.3E-08	30.0	
アナウンサー	機能喪失 ⁷⁾	-	-	-	3.0E-08	30.0	958%	562%	100%	100%	-	-	3.1E-09	30.0	

注釈*1. ハイパー事前分布のパラメータμの中央値の算出に利用した。
 *2. 事後分布を対称正規分布にフィッティングして求めた。
 *3. *2で求めた故障率分布の95%ile値、中央値を用いて評価した (EF=95%ile値/中央値)。
 *4. 事後分布の95%ile値、9%ile値を用いて評価した (EF(近似)=95%ile値/9%ile値)。
 *5. 特殊な故障率としてベイズ手法によるワイブル評価を実施した。
 *6. 簡易手法で評価した。
 *7. 特殊な故障率として工学的判断により算出した。
 *8. 機器1台当たりの故障率。
 *9. AFRの改良型制御機軸駆動装置を含む。
 *10. AFRを除いた従来のFR。
 *11. 機器間の1セクション(3相)当たりの故障率。
 *12. 機器間を1機器として算出した故障率。
 *13. 機器、容量変更前分岐によって区分される1セクション間当たりの故障率。