

# 女川原子力発電所第2号機 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要について

---

2021年7月29日  
東北電力株式会社

# 目次

---

1. はじめに
2. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策に係る技術基準規則の改正内容と対応方針
3. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要
4. まとめ

参考1 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策に係る技術基準規則の解釈等の改正内容と対応方針

参考2 アーク放電を発生させる試験

参考3 アーク火災発生の評価

参考4 HEAFに係る対策の判断基準

参考5 D/Gからの給電時におけるHEAF対策

参考6 先行審査プラントと女川2号機のHEAF対策比較

参考7 消磁コンタクタの構造, 動作原理について

参考8 D/G機関の停止による短絡電流供給停止までの代替検査について

# 1. はじめに

- 第876回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合(2020年7月14日)\*1において示した主な説明事項のうち『新たな規制要求(バックフィット)への対応事項』の『安全系電源盤に対する高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策』について説明する。

注記 \*1: 第876回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合(2020年7月14日)においては女川2号機の工事計画認可申請(補正)の概要を説明しており, 工事計画認可申請(補正)の状況や主な説明事項を説明している。

13

### 3.3 新たな規制要求(バックフィット)への対応事項

新たな規制要求(バックフィット)への対応について説明する。

表-3 その他説明項目

| No. | 項目                            | 内容  |
|-----|-------------------------------|---|
| 3-1 | 安全系電源盤に対する高エネルギーアーク(HEAF)火災対策 | 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, 電源盤燃焼試験から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。 |

今回説明

## 2. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策に係る技術基準規則の改正内容と対応方針

- 平成29年(2017年)8月8日に「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」(以下「技術基準規則」という。)及びその解釈が改正され, 高エネルギーアーク損傷による電気盤の損傷の拡大防止(以下「HEAF対策」という。)が要求された(表1参照)。
- 今回の工認申請において, 技術基準規則等に適合するよう, 高エネルギーアーク損傷(以下「HEAF」という。)対策が必要な電気盤(D/Gに接続される電気盤を含む。)について, 短絡により発生するアークエネルギーが, アーク火災発生防止のしきい値以下になるように, アーク放電の遮断時間を設計する。

表1 技術基準規則(抜粋)

| 改正後   | 改正前   | 対応方針  |
|---|---|---|
| (保安電源設備)<br>第四十五条 [略]<br>2 [略]<br>3 保安電源設備(安全施設へ電力を供給するための設備をいう。)には、第1項の電線路、当該発電用原子炉施設において常時使用される発電機及び非常用電源設備から発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な装置への電力の供給が停止することがないよう、次に掲げる措置を講じなければならない。 | (保安電源設備)<br>第四十五条 [略]<br>2 [略]<br>3 保安電源設備(安全施設へ電力を供給するための設備をいう。)には、第1項の電線路、当該発電用原子炉施設において常時使用される発電機及び非常用電源設備から発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な装置への電力の供給が停止することがないように、 <u>機器の損壊、故障その他の異常を検知するとともに、その拡大を防止するために必要な措置</u> を講じなければならない。 |   |
| <u>一 高エネルギーのアーク放電による電気盤の損壊の拡大を防止するために必要な措置</u>  | (号を加える)   | HEAF対策が必要な電気盤(D/Gに接続される電気盤を含む。)について, 短絡により発生するアークエネルギーが, アーク火災発生防止のしきい値以下になるように, アーク放電の遮断時間を設計する。 |
| <u>二 前号に掲げるもののほか、機器の損壊、故障その他の異常を検知し、及びその拡大を防止するために必要な措置</u>   | (号を加える)   |   |
| 4~8 [略]   | 4~8 [略]   |   |

### 3. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要

#### 3.1 アーク火災発生メカニズム

- 電気盤において、短絡によりアーク放電が発生すると、高温ガスが発生し、急激な圧力・温度上昇を伴うエネルギーの放出が発生する(HEAFの発生)。
- 高温ガスはアーク放電の発生箇所に滞留し、高温ガスから可燃物にエネルギーが伝播する。
- 可燃物に、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が発生する。
- アーク火災の発生を防止するため、アーク放電によるエネルギーが、あるしきい値を超えないようにアーク放電の遮断時間を適切に設計することによりHEAF対策を実施する。

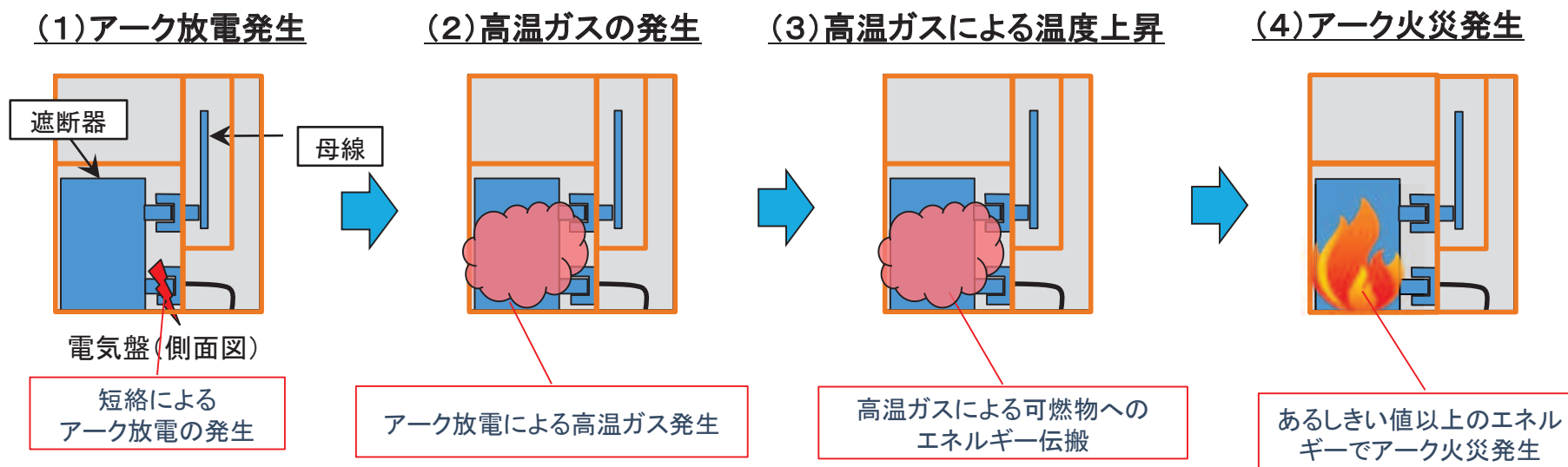


図1 アーク火災発生メカニズム

### 3. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要

#### 3.2 HEAF対策の概要

- HEAF対策を実施するための対応項目を表2に示す。

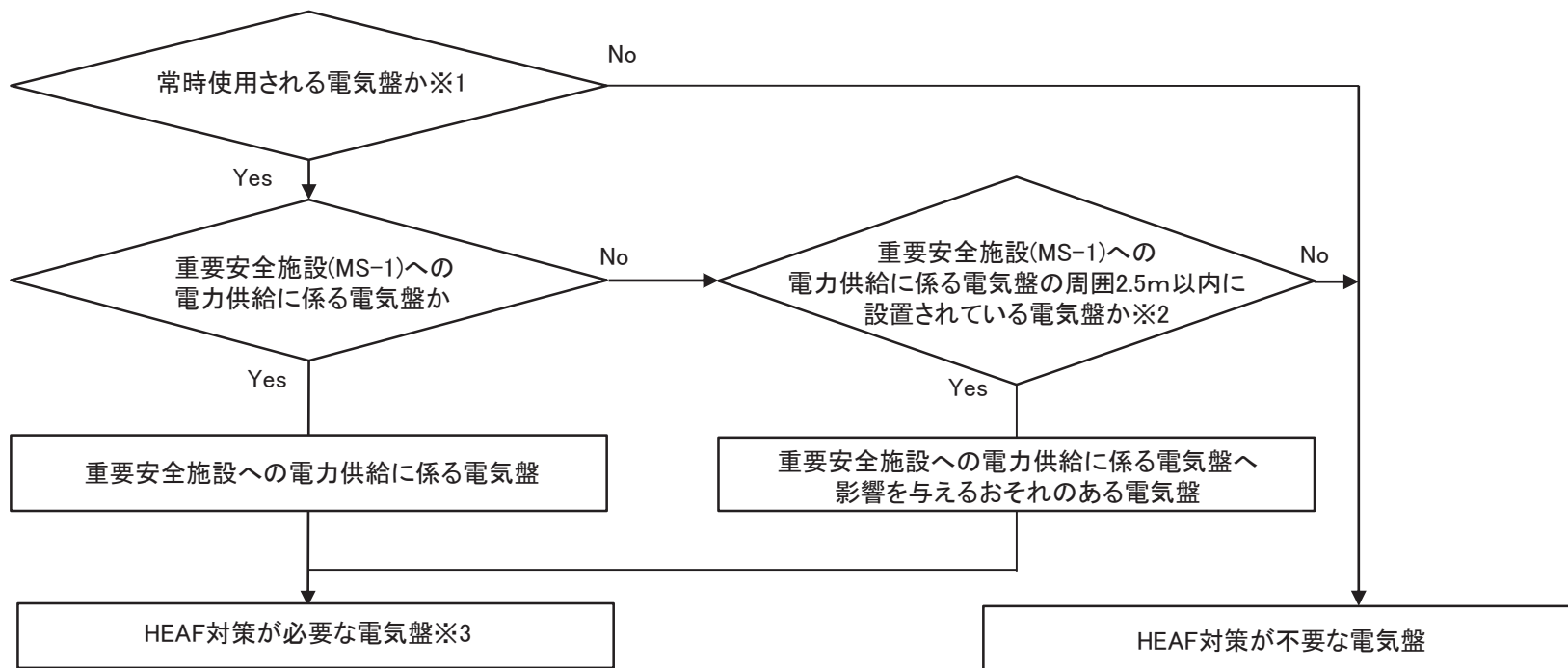
表2 HEAF対策の対応項目

| 対応項目                           | 頁     |
|--------------------------------|-------|
| 3.3 HEAF対策が必要な電気盤              | 6～7   |
| 3.4 アーク放電を発生させる試験              | 8     |
| 3.5 アーク火災発生の評価                 | 9     |
| 3.6 HEAFに係る対策の判断基準             | 10    |
| 3.7 D/Gからの給電時以外のHEAF対策         | 11    |
| 3.8 D/Gからの給電時のHEAF対策           | 12～13 |
| 3.9 電気盤のアークエネルギー及びアーク放電の遮断時間一覧 | 14～17 |

### 3. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要

#### 3.3 HEAF対策が必要な電気盤(1/2)

- HEAF対策が必要な電気盤は、「**实用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則**」(以下「**技術基準規則**」という。)の解釈にて「**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「**实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**」の解釈にて重要度分類MS-1の「**原子炉の緊急停止機能**」などの機能を有する構築物等が対象と定義されている(詳細は参考1参照)。
- 上記を基に、図2のフローにてHEAF対策が必要な電気盤を選定した。



※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状態をいう。

※2 「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対策が来ているものとする(審査ガイドによる。)

図2 HEAF対策が必要な電気盤フロー図

### 3. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要

#### 3.3 HEAF対策が必要な電気盤(2/2)

➤ 抽出フローに従い、HEAF対策が必要な電気盤を選定した結果を図3に示す。

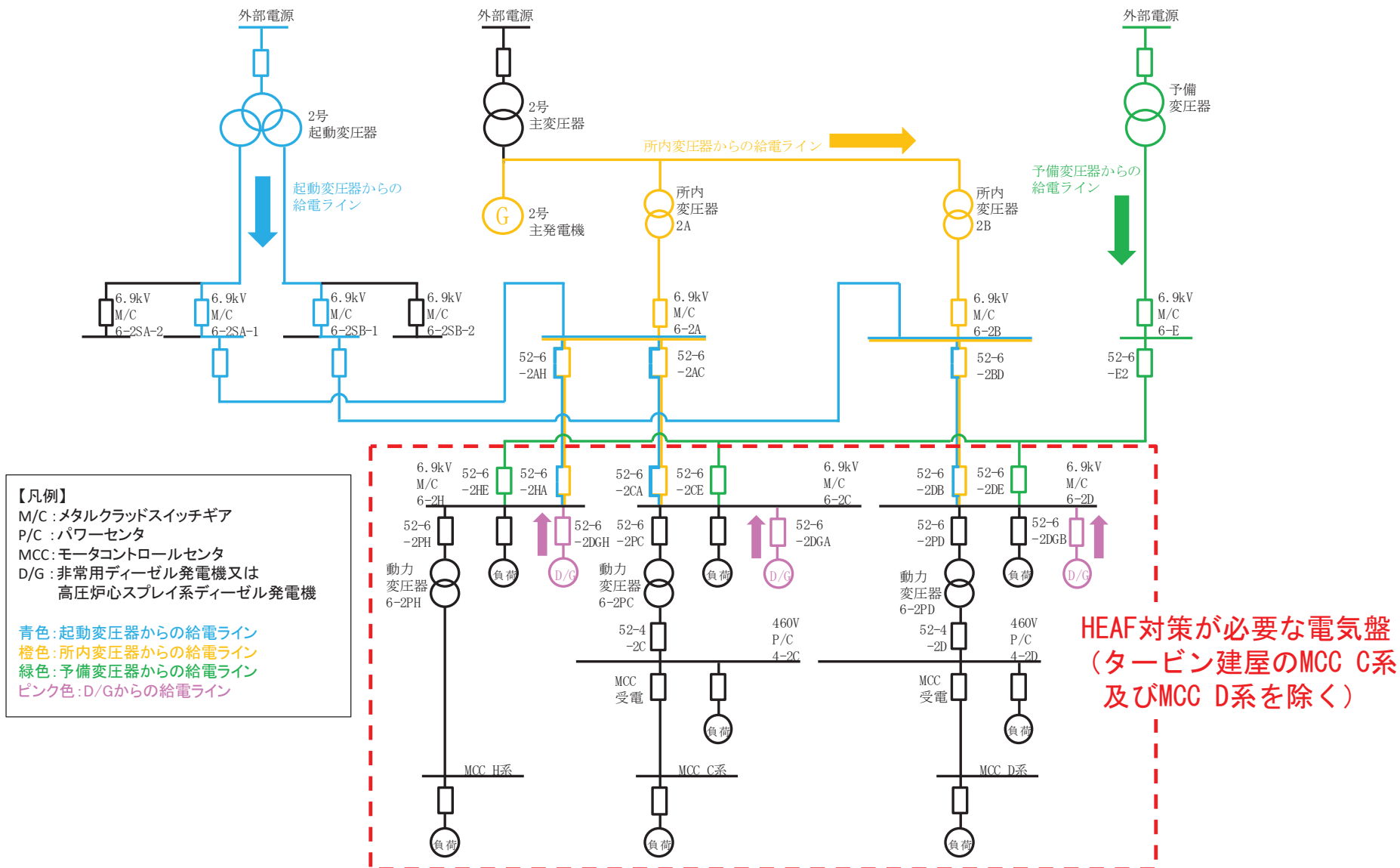


図3 女川2号機 電気盤系統図



### 3. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要

#### 3.4 アーク放電を発生させる試験

- 審査ガイドを踏まえて、表3のとおりに対応しHEAF試験を実施した。

表3 審査ガイドへの対応内容 (1/3)

| 審査ガイド                          | 対応内容   | 記載箇所          |
|--------------------------------|--|---------------|
| 1. 総則                          | 「目的, 適用範囲, 用語の定義」のため省略   | —             |
| 2. アーク放電を発生させる試験<br>2.1 電気盤の選定 | 実際に発電所内で使用されているものと同等の電気盤を選定した。                                   | 参考2<br>P23~26 |
| 2.2 短絡電流の目標値                   | 試験時の短絡電流値, 印加電圧は, 実機プラントで使用している電気盤の三相短絡電流値, 定格電圧値を踏まえて設定した。      | 参考2 P27       |
| 2.3 HEAF試験に用いる電気回路             | HEAF試験は, 審査ガイドの付録Aの電気回路と同等の試験回路で実施した。                            | 参考2 P28       |
| 2.4 測定項目                       | HEAF試験時に電圧電流波形, 熱流束等を測定した。                                       | 参考2 P28       |
| 2.5 アーク放電の発生方法                 | アーク放電を発生するための導電性針金のワイヤリングを, 適切な規格に基づき電気盤の遮断器の受電側及び配電側に施し試験を実施した。 | 参考2 P29       |
| 2.6 アーク放電の継続時間                 | アーク放電の継続時間は, アークエネルギーのしきい値を得るために段階的に設定した。                        | 参考2 P30       |
| 2.7 HEAF試験の実施                  | 2.1~2.6の対応を行い試験を実施した。  | 参考2 P31       |
| 2.8 アークエネルギーの計算                | アークエネルギーは試験で測定した電流・電圧から求めた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た。            | 参考2 P32       |

### 3. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要

#### 3.5 アーク火災発生の評価

- 審査ガイドを踏まえて、表3のとおりに対応しアークエネルギーしきい値の評価を実施した。

表3 審査ガイドへの対応内容 (2/3)

| 審査ガイド                              | 対応内容  | 記載箇所          |
|------------------------------------|---|---------------|
| 3. アーク火災発生の評価<br>3.1 アーク火災発生の評価の概要 | 電気盤の目視又は測定した電気盤周囲の発熱速度から火災発生を確認した。  | 参考3<br>P33    |
| 3.2 評価に用いる必要データ                    | 試験を実施した電力中央研究所は、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3<br>P33    |
| 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  | アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値は、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に保守性を考慮して設定した。このアークエネルギー値は、アーク火災が発生したアークエネルギー値を下回っている。 | 参考3<br>P33～37 |
| 3.4 しきい値に係る解析による評価                 | しきい値は試験結果から求めており、解析による評価は用いていない。  | —             |

- 審査ガイドに基づくHEAF試験によって得られた各電気盤のアークエネルギーのしきい値を表4に示す。

表4 各電気盤のアーク火災発生防止のしきい値

|          | アーク火災発生防止しきい値(MJ) | アーク火災が発生しなかった最大のアークエネルギー(MJ) |
|----------|-------------------|------------------------------|
| M/C      | 25                | 25.3                         |
| P/C      | 18                | 18.9                         |
| MCC      | 4.4               | 4.49                         |
| M/C(D/G) | 16                | 16.6                         |

### 3. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要

#### 3.6 HEAFに係る対策の判断基準

➤ 審査ガイドを踏まえて、表3のとおりHEAF対策の判断基準を満足するように、アーク放電の遮断時間を設計した。

表3 審査ガイドへの対応内容 (3/3)

| 審査ガイド             | 対応内容  | 記載箇所                    |
|-------------------|---|-------------------------|
| 4. HEAFに係る対策の判断基準 | HEAF対策が必要な電気盤(D/Gに接続される電気盤を含む。)について、短絡により発生するアークエネルギーをアーク火災発生防止のしきい値以下として、判断基準を満足するように、アーク放電の遮断時間を設計した。 | P14~17<br>参考4<br>P38~41 |

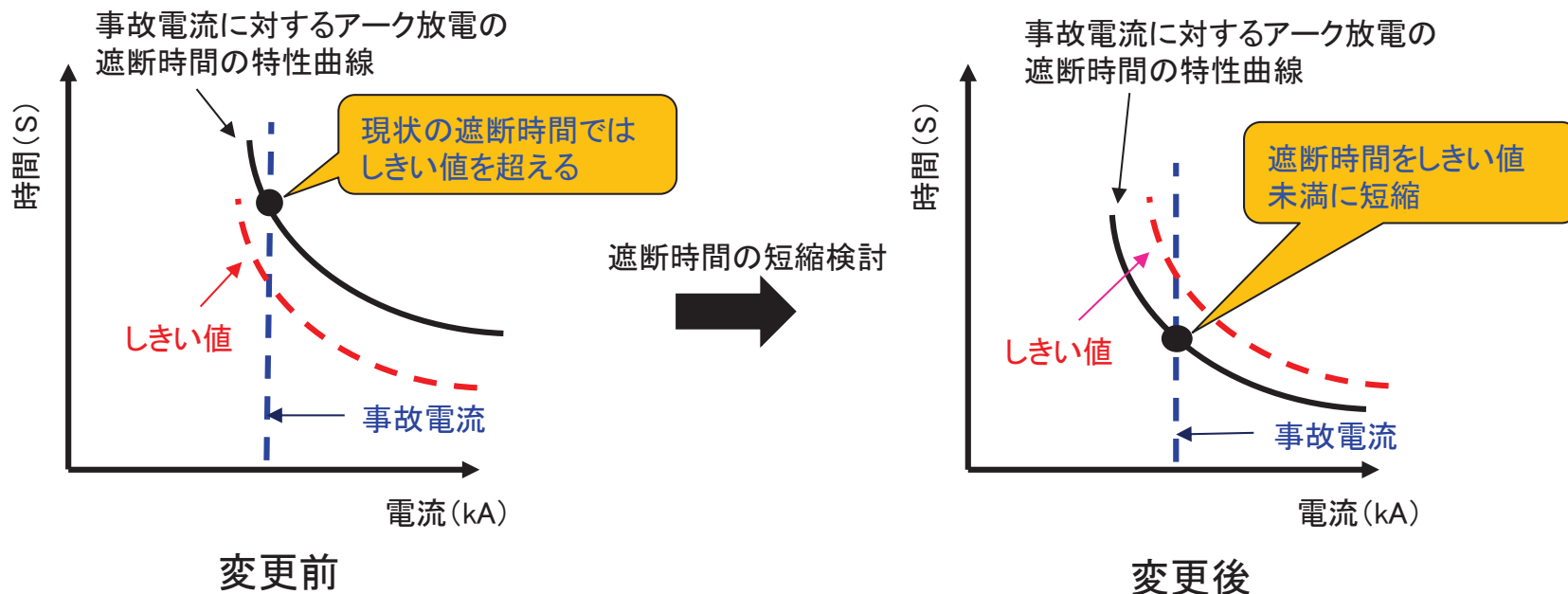
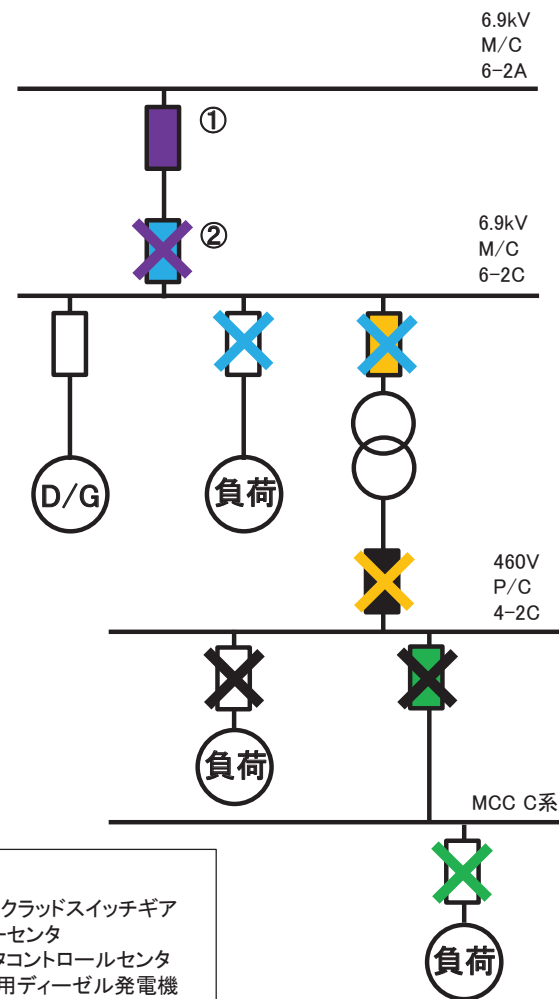


図4 遮断器の遮断時間変更イメージ

# 3. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要

## 3.7 D/Gからの給電時以外のHEAF対策

- 図5のM/C 6-2C母線に接続される②遮断器でHEAFが発生した場合、上流にある①遮断器により短絡電流を遮断する。
- ①遮断器の遮断時間は、遮断器の遮断時間に含まれる誤差を考慮したうえでM/Cのしきい値(25MJ)を下回るように設計する。
- その他の遮断器に関しても、上流の遮断器により短絡電流を適切な遮断時間にて遮断することにより、アーク火災発生防止のしきい値を下回るように設計する。
- なお、遮断器の遮断時間の設定に当たっては、上流及び下流の遮断器の遮断時間の協調を考慮することにより、故障による影響範囲を局所化する設計とする。



凡例  
M/C:メタルクラッドスイッチギア  
P/C:パワーセンタ  
MCC:モータコントロールセンタ  
D/G:非常用ディーゼル発電機

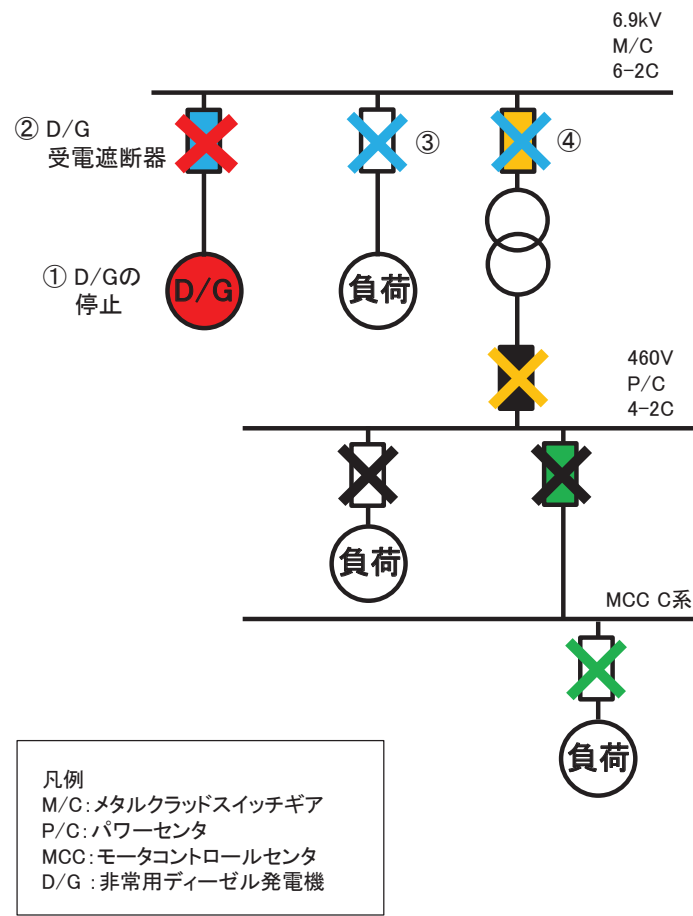
「×」はアーク放電箇所を示し、塗潰した遮断器は下流にある同色のアーク放電箇所へ流れ込む短絡電流を遮断するために開放する遮断器

図5 女川2号機 非常用電源C系統 (D/Gからの給電時以外)

### 3. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要

#### 3. 8 D/Gからの給電時のHEAF対策(1/2)

- 図6の②D/G受電遮断器でHEAFが発生した場合, 上流にある①D/Gの停止により, 短絡電流を遮断する。
- ①D/Gの停止時間は, 遮断時間等に含まれる誤差を考慮した上でM/C(D/G)のしきい値(16MJ)を下回るように設計する。
- ③及び④のM/Cに接続される遮断器でHEAFが発生した場合, 上流にある②D/G受電遮断器により, 短絡電流を遮断する。
- その他の遮断器に関しても, 上流の遮断器により短絡電流を適切な遮断時間にて遮断することにより, アーク火災発生防止のしきい値を下回るように設計する。
- なお, 遮断器の遮断時間の設定に当たっては, 上流及び下流の遮断器の遮断時間の協調を考慮することにより, 故障による影響範囲を局所化する設計とする。



「x」はアーク放電箇所を示し, 塗潰した遮断器は下流にある同色のアーク放電箇所へ流れ込む短絡電流を遮断するために開放する遮断器(D/G受電遮断器はD/G停止により短絡電流を遮断)

図6 女川2号機 非常用電源C系統 (D/Gからの給電時)

### 3. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要

#### 3.8 D/Gからの給電時のHEAF対策(2/2)

➤ D/G受電遮断器でHEAFが発生した場合、D/Gを停止するため「過電流継電器(51)」及びタイマーのインターロックを追加する。

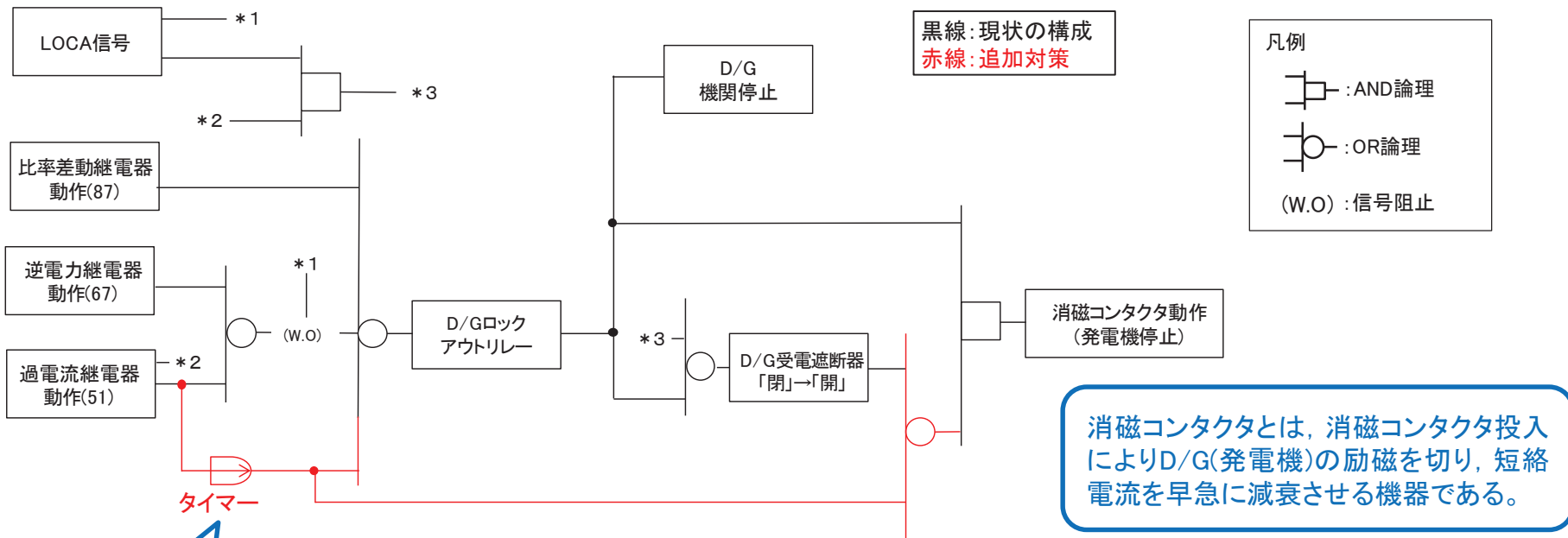


図7 D/Gインターロック概要

D/G受電遮断器でHEAFが発生した場合は過電流継電器(51)及びタイマーの動作により、D/Gの停止及び消磁コンタクトの動作を実施し、アーク火災の発生を防ぐ。

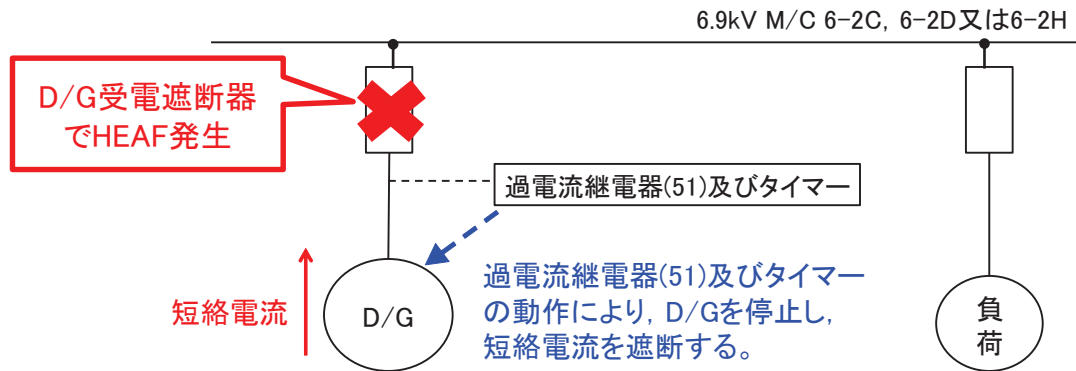


図8 D/Gからの給電時のHEAF対策イメージ

### 3. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要

#### 3.9 電気盤のアークエネルギー及びアーク放電の遮断時間一覧(1/4) (D/Gからの給電時以外)

➤ 表5に示したアーク放電の遮断時間にて設計することにより、アークエネルギーをしきい値以下にする。

表5 電気盤のアークエネルギー及びアーク放電の遮断時間一覧(1/4) (D/Gからの給電時以外)

| アーク放電発生箇所          |          | アーク放電を遮断するために開放する遮断器   | アーク放電の遮断時間(sec)     | アークエネルギー(MJ) | しきい値(MJ) |
|--------------------|----------|--|---------------------|--------------|----------|
| 電気盤                | 遮断器名称    |  |                     |              |          |
| メタルクラッドスイッチギア(非常用) | M/C 6-2C | 母線連絡遮断器<br>52-6-2CA  | 母線連絡遮断器<br>52-6-2AC | 0.400        | 22.56    |
|                    |          | 母線連絡遮断器<br>52-6-2CE  | 母線連絡遮断器<br>52-6-E2  | 0.513        | 18.50    |
|                    |          | M/C 6-2Cに接続される遮断器<br>(母線連絡遮断器 52-6-2CA,<br>母線連絡遮断器 52-6-2CE及び<br>非常用ディーゼル発電機(A)受電遮断器<br>52-6-2DGAを除く。) | 母線連絡遮断器<br>52-6-2CA | 0.374        | 21.09    |
|                    |          |  | 母線連絡遮断器<br>52-6-2CE | 0.286        | 10.31    |
|                    | M/C 6-2D | 母線連絡遮断器<br>52-6-2DB  | 母線連絡遮断器<br>52-6-2BD | 0.400        | 22.56    |
|                    |          | 母線連絡遮断器<br>52-6-2DE  | 母線連絡遮断器<br>52-6-E2  | 0.513        | 18.50    |
|                    |          | M/C 6-2Dに接続される遮断器<br>(母線連絡遮断器 52-6-2DB,<br>母線連絡遮断器 52-6-2DE及び<br>非常用ディーゼル発電機(B)受電遮断器<br>52-6-2DGBを除く。) | 母線連絡遮断器<br>52-6-2DB | 0.374        | 21.09    |
|                    |          |  | 母線連絡遮断器<br>52-6-2DE | 0.286        | 10.31    |

25

### 3. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要

#### 3.9 電気盤のアークエネルギー及びアーク放電の遮断時間一覧(2/4) (D/Gからの給電時以外)

表5 電気盤のアークエネルギー及びアーク放電の遮断時間一覧(2/4) (D/Gからの給電時以外)

| アーク放電発生箇所                     |             | アーク放電を遮断するために開放する遮断器   | アーク放電の遮断時間(sec)      | アークエネルギー(MJ) | しきい値(MJ) |       |
|-------------------------------|-------------|--|----------------------|--------------|----------|-------|
| 電気盤                           | 遮断器名称       |  |                      |              |          |       |
| メタルクラッドスイッチギア<br>(高圧炉心スプレイ系用) | M/C<br>6-2H | 母線連絡遮断器<br>52-6-2HA  | 母線連絡遮断器<br>52-6-2AH  | 0.370        | 25       |       |
|                               |             | 母線連絡遮断器<br>52-6-2HE  | 母線連絡遮断器<br>52-6-E2   | 0.513        |          |       |
|                               |             | M/C 6-2Hに接続される遮断器<br>(母線連絡遮断器 52-6-2HA,<br>母線連絡遮断器52-6-2HE及び<br>高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機<br>受電遮断器52-6-2DGHを除く。) | 母線連絡遮断器<br>52-6-2HA  | 0.345        |          | 19.46 |
|                               |             |  | 母線連絡遮断器<br>52-6-2HE  | 0.286        |          | 10.31 |
| パワーセンタ(非常用)                   | P/C<br>4-2C | 受電遮断器<br>52-4-2C   | 動力変圧器遮断器<br>52-6-2PC | 0.996        | 18       |       |
|                               |             | P/C 4-2Cに接続される遮断器<br>(受電遮断器 52-4-2Cを除く。)   | 受電遮断器<br>52-4-2C     | 0.670        |          | 10.54 |
|                               | P/C<br>4-2D | 受電遮断器<br>52-4-2D   | 動力変圧器遮断器<br>52-6-2PD | 0.996        |          | 15.67 |
|                               |             | P/C 4-2Dに接続される遮断器<br>(受電遮断器 52-4-2Dを除く。)   | 受電遮断器<br>52-4-2D     | 0.670        |          | 10.54 |



### 3. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要

#### 3.9 電気盤のアークエネルギー及びアーク放電の遮断時間一覧(3/4) (D/Gからの給電時以外)

表5 電気盤のアークエネルギー及びアーク放電の遮断時間一覧(3/4) (D/Gからの給電時以外)

| アーク放電発生箇所                    |           | アーク放電を遮断<br>するために開放する<br>遮断器 | アーク放電の<br>遮断時間<br>(sec) | アーク<br>エネルギー<br>(MJ) | しきい値<br>(MJ) |
|------------------------------|-----------|------------------------------|-------------------------|----------------------|--------------|
| 電気盤                          | 遮断器名称     |                              |                         |                      |              |
| モータコントロールセンタ(非常用)            | MCC<br>C系 | C/B MCC 2C-1に接続される遮断器        | C/B MCC 2C-1受電遮断器       | 0.170                | 3.87         |
|                              |           | C/B MCC 2C-2に接続される遮断器        | C/B MCC 2C-2受電遮断器       | 0.170                | 3.87         |
|                              |           | R/B MCC 2C-1に接続される遮断器        | R/B MCC 2C-1受電遮断器       | 0.170                | 3.87         |
|                              |           | R/B MCC 2C-2に接続される遮断器        | R/B MCC 2C-2受電遮断器       | 0.170                | 3.87         |
|                              |           | R/B MCC 2C-3に接続される遮断器        | R/B MCC 2C-3受電遮断器       | 0.170                | 3.87         |
|                              |           | R/B MCC 2C-4に接続される遮断器        | R/B MCC 2C-4受電遮断器       | 0.170                | 3.87         |
|                              |           | R/B MCC 2C-5に接続される遮断器        | R/B MCC 2C-5受電遮断器       | 0.170                | 3.87         |
|                              | MCC<br>D系 | C/B MCC 2D-1に接続される遮断器        | C/B MCC 2D-1受電遮断器       | 0.170                | 3.87         |
|                              |           | C/B MCC 2D-2に接続される遮断器        | C/B MCC 2D-2受電遮断器       | 0.170                | 3.87         |
|                              |           | R/B MCC 2D-1に接続される遮断器        | R/B MCC 2D-1受電遮断器       | 0.170                | 3.87         |
|                              |           | R/B MCC 2D-2に接続される遮断器        | R/B MCC 2D-2受電遮断器       | 0.170                | 3.87         |
|                              |           | R/B MCC 2D-3に接続される遮断器        | R/B MCC 2D-3受電遮断器       | 0.170                | 3.87         |
|                              |           | R/B MCC 2D-4に接続される遮断器        | R/B MCC 2D-4受電遮断器       | 0.170                | 3.87         |
|                              |           | R/B MCC 2D-5に接続される遮断器        | R/B MCC 2D-5受電遮断器       | 0.170                | 3.87         |
| モータコントロールセンタ<br>(高圧炉心スプレイ系用) | MCC<br>H系 | R/B MCC 2HIに接続される遮断器         | 動力変圧器遮断器<br>52-6-2PH    | 0.318                | 3.71         |

4.4

### 3. 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策の概要

#### 3.9 電気盤のアークエネルギー及びアーク放電の遮断時間一覧(4/4) (D/Gからの給電時)

表5 電気盤のアークエネルギー及びアーク放電の遮断時間一覧(4/4) (D/Gからの給電時)

| アーク放電発生箇所                     |             | アーク放電を遮断するために開放する遮断器   | アーク放電の遮断時間(sec)                             | アークエネルギー(MJ) | しきい値(MJ) |
|-------------------------------|-------------|--|---|--------------|----------|
| 電気盤                           | 遮断器名称       |  |   |              |          |
| メタルクラッドスイッチギア<br>(非常用)        | M/C<br>6-2C | 非常用ディーゼル発電機(A)受電遮断器<br>52-6-2DGA                               | —*  | 7.077        | 16       |
|                               |             | M/C 6-2Cに接続される遮断器<br>(非常用ディーゼル発電機(A)受電遮断器<br>52-6-2DGAを除く。)    | 非常用ディーゼル<br>発電機(A)受電遮断器<br>52-6-2DGA        | 2.485        |          |
|                               | M/C<br>6-2D | 非常用ディーゼル発電機(B)受電遮断器<br>52-6-2DGB                               | —*  | 7.077        |          |
|                               |             | M/C 6-2Dに接続される遮断器<br>(非常用ディーゼル発電機(B)受電遮断器<br>52-6-2DGBを除く。)    | 非常用ディーゼル<br>発電機(B)受電遮断器<br>52-6-2DGB        | 2.485        |          |
| メタルクラッドスイッチギア<br>(高圧炉心スプレイ系用) | M/C<br>6-2H | 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機<br>受電遮断器<br>52-6-2DGH                        | —*  | 6.834        |          |
|                               |             | M/C 6-2Hに接続される遮断器<br>(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機<br>受電遮断器52-6-2DGHを除く。) | 高圧炉心スプレイ系<br>ディーゼル発電機<br>受電遮断器<br>52-6-2DGH | 1.702        |          |

注記 \* :メタルクラッドスイッチギアにおけるアーク放電を遮断するため、D/Gを停止する。

## 4. まとめ

- HEAF対策が必要な電気盤を，技術基準規則及び審査ガイドに基づき選定した。
- アーク火災が発生しないアークエネルギーを実証試験により求め，アーク火災発生防止のしきい値を決定した。
- HEAF対策が必要な電気盤(D/Gに接続される電気盤を含む。)について，短絡により発生するアークエネルギーが，アーク火災発生防止のしきい値以下になるように，アーク放電の遮断時間を設計した。
- 以上により，HEAF対策を適切に実施する。

---

以下，參考資料

## 参考1 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策に係る技術基準規則の解釈等の 改正内容と対応方針(1/3)

➤ 技術基準規則の解釈及び審査ガイドを参考表1-1及び1-2に示す。

### (1)技術基準規則の解釈(下線は改正部分)

参考表1-1 技術基準規則の解釈(抜粋)

| 改正後  | 改正前  | 対応方針  |
|--|--|---|
| <p>第45条(保安電源設備)<br/>1～3 (略)</p> <p>4 <u>第3項第1号に規定する「高エネルギーの<br/>アーク放電による電気盤の損壊の拡大を防止<br/>するために必要な措置」とは、重要安全施設<br/>(設置許可基準規則第2条第2項第9号に<br/>規定する重要安全施設をいう。以下同じ。)へ<br/>の電力供給に係る電気盤及び当該電気盤に<br/>影響を与えるおそれのある電気盤(安全施設<br/>(重要安全施設を除く。)への電力供給に係る<br/>ものに限る。)について、遮断器の遮断時間<br/>の適切な設定等により、高エネルギーのア<br/>ーク放電によるこれらの電気盤の損壊の拡大を<br/>防止することができることをいう。</u></p> <p>5～10 (略)</p> | <p>第45条(保安電源設備)<br/>1～3 (略)</p> <p>(新設)</p> <p>4～8 (略)</p> | <p>HEAF対策が必要な電気盤(D/Gに接続され<br/>る電気盤を含む。)について、短絡により発生<br/>するアークエネルギーが、アーク火災発生防<br/>止のしきい値以下になるように、アーク放電の<br/>遮断時間を設計する。</p> |

### (2) 審査ガイド(新設)

参考表1-2 審査ガイド(抜粋)

| 審査ガイド(抜粋)   | 対応方針   |
|---|--|
| <p>1. 総則</p> <p>1.1 目的<br/>(略)</p> <p>本ガイドは、電気盤においてアーク火災の発生を防止するための、遮断器の遮断時間について、その妥当性を審査官が判断するための考え方の一例を示すものである。</p> | <p>新たに制定された審査ガイドを踏まえ、HEAF<br/>対策が必要な電気盤(D/Gに接続される電気<br/>盤を含む。)について、短絡により発生する<br/>アークエネルギーが、アーク火災発生防止の<br/>しきい値以下になるように、アーク放電の遮断<br/>時間を設計する。</p> |

## 参考1 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策に係る技術基準規則の解釈等の 改正内容と対応方針(2/3)

### (3)経過措置

平成29年(2017年)8月8日の技術基準規則改正後の第45条第3項の規定については、技術基準規則の附則により、非常用発電機に接続される電気盤に関する措置に係る部分を除いて、平成31年(2019年)8月1日以降の施設定期検査を終了した日までの経過措置が設けられている。また、非常用発電機に接続される電気盤に関する措置に係る部分については、同附則により、平成33年(2021年)8月1日以降の施設定期検査を終了した日又は運転を開始する日の前日のいずれか早い日までの間の経過措置が設けられている

参考表1-3 技術基準規則(抜粋)

| 技術基準規則(抜粋)  | 対応方針  |
|---|---|
| <p>附 則 (平成29年8月8日原子力規制委員会規則第12号)<br/>(経過措置)<br/>第二条 (略)</p> <p>3 この規則の施行の際現に設置され又は設置に着手されている発電用原子炉施設(法第43条の3の5第2項第5号に規定する発電用原子炉施設をいう。以下同じ。)に対する第1条の規定による改正後の実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則(以下「新実用炉規則」という。)第45条第3項(非常用発電機に接続される電気盤に関する措置に係る部分を除く。以下この項において同じ。)及び第1条の規定による改正後の研究開発段階発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則(以下「新研開炉規則」という。)第44条第3項(非常用発電機に接続される電気盤に関する措置に係る部分を除く。以下この項において同じ。)の規定の適用については、平成31年8月1日以後最初に当該発電用原子炉施設に係る法第43条の3の15の検査を終了した日又は平成31年8月1日以後に発電用原子炉(法第2条第5項に規定する発電用原子炉をいう。次項において同じ。)の運転を開始する日の前日のいずれか早い日までの間(以下この項において「経過措置期間」という。)は、なお従前の例による。ただし、次に掲げるものについては、この限りでない。<br/>(略)</p> <p>4 この規則の施行の際現に設置され又は設置に着手されている発電用原子炉施設に対する新実用炉規則第45条第3項(非常用発電機に接続される電気盤に関する措置に係る部分に限る。)及び新研開炉規則第44条第3項(非常用発電機に接続される電気盤に関する措置に係る部分に限る。)の規定の適用については、平成33年8月1日以後最初に当該発電用原子炉施設に係る法第43条の3の15の検査を終了した日又は平成33年8月1日以後に発電用原子炉の運転を開始する日の前日のいずれか早い日までの間(以下この項において「経過措置期間」という。)は、なお従前の例による。ただし、次に掲げるものについては、この限りでない。<br/>(略)</p> | <p>今回の工事計画認可申請(補正)において、HEAF対策が必要な電気盤(D/Gに接続される電気盤を含む。)について、短絡により発生するアークエネルギーが、アーク火災発生防止のしきい値以下になるように、アーク放電の遮断時間を設計することにより、発電用原子炉の運転を開始する日の前日までにHEAF対策を実施する。</p> |

## 参考1 高エネルギーアーク損傷(HEAF)対策に係る技術基準規則の解釈等の 改正内容と対応方針(3/3)

### (4)「实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

- 重要安全施設は参考表1-4のように「实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」の解釈にて定義されている。

参考表1-4 实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及びその解釈（抜粋）

| 实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   | 实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   |
|---|--|
| <p>(安全施設)<br/>第十二条<br/>(略)</p> <p>6 重要安全施設は、二以上の発電用原子炉施設において共用し、又は相互に接続するものであってはならない。ただし、二以上の発電用原子炉施設と共用し、又は相互に接続することによって当該二以上の発電用原子炉施設の安全性が向上する場合は、この限りでない。(略)</p> | <p>第12条(安全施設)<br/>(略)</p> <p>11 第6項に規定する「重要安全施設」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」においてクラスMS-1に分類される下記の機能を有する構築物等を対象とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉の緊急停止機能</li> <li>・未臨界維持機能</li> <li>・原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能</li> <li>・原子炉停止後の除熱機能</li> <li>・炉心冷却機能</li> <li>・放射性物質の閉じ込め機能並びに放射線の遮蔽及び放出低減機能(ただし、可搬型再結合装置及び沸騰水型発電用原子炉施設の排気筒(非常用ガス処理系排気管の支持機能を持つ構築物)を除く。)</li> <li>・工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能</li> <li>・安全上特に重要な関連機能(ただし、原子炉制御室遮蔽、取水口及び排水口を除く。)</li> </ul> |



### 2.1 電気盤の選定(1/4)

- HEAF試験に用いた電気盤については、アーク火災発生の有無に影響を与える以下の4つのパラメータのうち、電気盤の同等性に影響を与えるおそれのある「②高温ガスの滞留場所」及び「③可燃物」の観点で、実際に使用されているもの(以下「実機」という。)と同等の電気盤を選定しており、実機と試験体は同等性を有している。
- ① 非密閉性の程度: 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。
  - ② 高温ガスの滞留場所: HEAF試験の結果や、アーク火災のメカニズムを考慮すると、盤の構造等の差異が電気盤選定の同等性に影響を与えるおそれがある。
  - ③ 可燃物: HEAF試験の結果や、アーク火災のメカニズムを考慮すると、高温ガスの滞留場所にある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が電気盤選定の同等性に影響を与えるおそれがある。
  - ④ アークエネルギー: 審査ガイドを踏まえ、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与えるおそれはない。



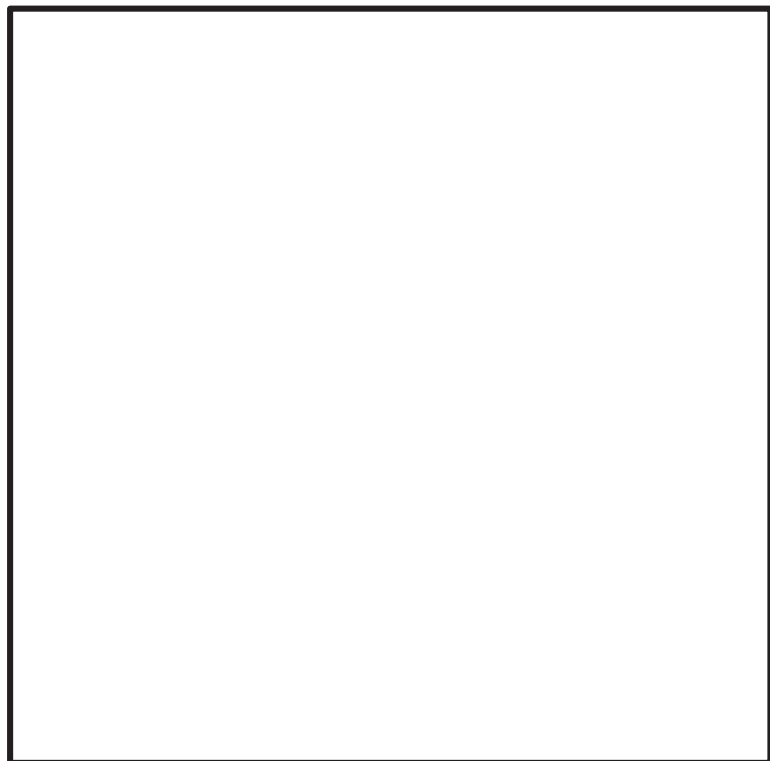
参考図2-1 HEAF試験状況 (M/C試験時)



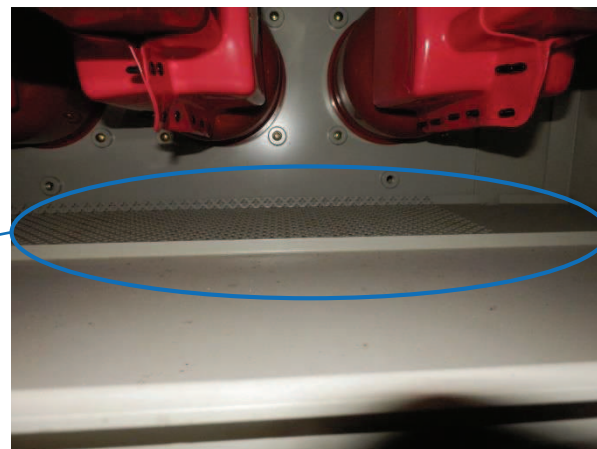
## 2.1 電気盤の選定(2/4)

### ①非密閉性の程度に対する同等性

- 電気盤は参考図2-2のとおり、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。



盤を側面から見た構成図




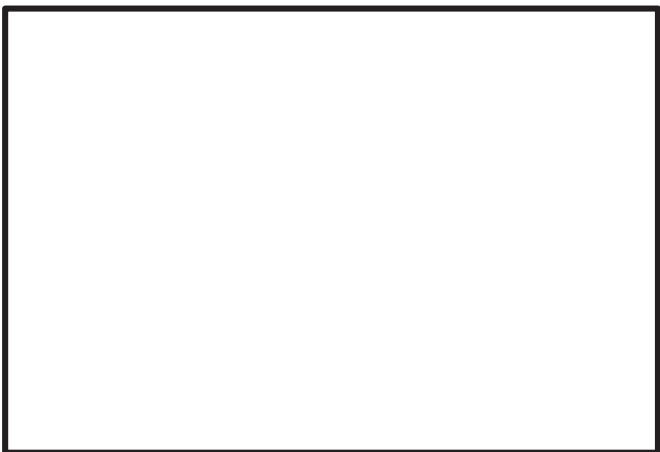
参考図2-2 実機の電気盤の開口部 (M/C)

## 2.1 電気盤の選定(3/4)

### 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。実機と試験体の電気盤は、日本電機工業会規格(以下「JEM」という。)及び電気規格調査会標準規格(以下「JEC」という。)に基づき製造されており、実機と同等の盤構造を有する電気盤を試験体として選定した。このため、高温ガスの滞留場所について、実機と試験体は同等性を有している。

参考表2-1 実機と試験体の電気盤との比較(M/C(D/G))

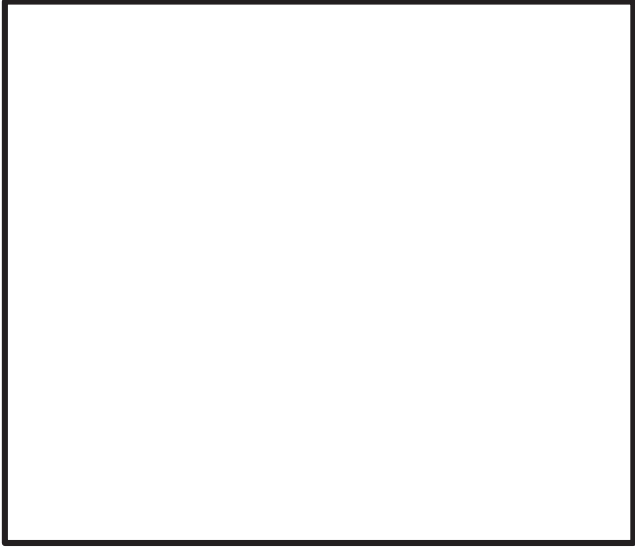

|                    | 実機  | 試験体  |
|--------------------|---|--|
| 規格類                | 盤:JEM-1425<br>遮断器:JEC-2300  | 同左   |
| 盤構造(JEM-1425「分類」)  | コンパートメント型構造<br>(遮断器, 母線, ケーブルをそれぞれ区分したコンパートメントに収納する構造)                              |  |
| 定格電圧(JEC-2300「定格」) | 7.2kV   |  |
| 外径寸法               |  |  |

## 2.1 電気盤の選定(4/4)

### 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、主に通電部周りの絶縁物である。当該箇所を使用される絶縁物の材料が、実機と同等又は同等の耐熱クラス※の電気盤を試験体として選定した。
- 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。

参考表2-2 実機と試験体の電気盤との比較(M/C)

|        | 実機  | 試験体  |
|--------|---|--|
| 絶縁物の材料 | エポキシ樹脂(耐熱温度:150°C~200°C)<br>・ブッシング  | エポキシ樹脂(耐熱温度:150°C~200°C)<br>・ブッシング   |
| 外形図    |  |  |

※ 耐熱クラスはJIS C4003(電気絶縁-熱的耐久性評価及び呼び方)に基づく階級であり、耐熱クラスE(最高使用温度120°C)、耐熱クラスB(最高使用温度130°C)、耐熱クラスF(最高使用温度155°C)のようなクラス分けとなる。

## 2.2 短絡電流の目標値

➤ 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及び定格電圧値を踏まえて参考表2-3及び2-4のとおり設定している。

参考表2-3 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】女川2号機のHEAF対策対象の電気盤の短絡電流値            |
|----------|------------------|---|
| M/C      | 18.9kA又は40.0kA*1 | 29.9kA又は46.8kA*2                        |
| P/C      | 45.0kA           | 37.4kA*3                                |
| MCC      | 45.0kA           | 19.2kA又は37.4kA*4                        |
| M/C(D/G) | 5.0kA            | 約1.7kA(D/G(A)及び(B))<br>約2.7kA(D/G(H))*5 |

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: M/C(C),(D)及び(H)で発生する短絡電流値を記載。  
(起動変圧器からの給電時: 46.8kA, 予備変圧器からの給電時: 29.9kA)
- \* 3: P/C(C)及び(D)で発生する短絡電流値を記載。
- \* 4: MCC(C系),(D系)及び(H系)で発生する短絡電流値を記載。  
(MCC(C系)及び(D系)への給電時: 37.4kA, MCC(H系)への給電時: 19.2kA)
- \* 5: 「第3回新規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)」での試験条件設定の考え方詳細(補6)に従い、M/C(D/G)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・長時間電流領域の短絡電流を示す。

参考表2-4 HEAF試験時における試験初期の印加電圧

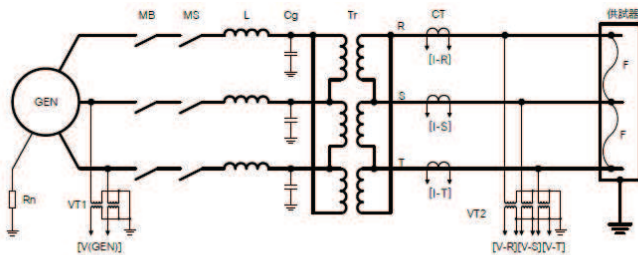
| 電気盤      | 試験初期の印可電圧      | 【参考】女川2号機のHEAF対策対象の電気盤の定格使用電圧 |
|----------|----------------|-------------------------------|
| M/C      | 6.9kV又は8.0kV*1 | 6.9kV*2                       |
| P/C      | 504V           | 460V*3                        |
| MCC      | 504V           | 460V*4                        |
| M/C(D/G) | 6.9kV          | 6.9kV*5                       |

注記

- \* 1: 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。
- \* 2: M/C(C),(D)及び(H)の定格使用電圧を記載。
- \* 3: P/C(C)及び(D)の定格使用電圧を記載。
- \* 4: MCC(C系),(D系)及び(H系)の定格使用電圧を記載。
- \* 5: M/C(D/G)の定格使用電圧を記載。

## 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、審査ガイドに示されているものと同様に短絡発電機、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いる。



- GEN 短絡発電機
- Rn 中性点抵抗
- MB 主遮断器
- MS 投入器
- L 限流リアクトル
- Cg サージ吸収用コンデンサ
- Tr 変圧器 (15 kV / 12 kV)
- VT1 計器用変圧器 (15 kV / 100 V)
- VT2 計器用変圧器 (33 kV / 110 V)
- CT 変流器 (4kA/1A, max63kA)
- F 直径0.5 mmの銅線

- ・計器用変圧器、変流器を介して電圧電流波形を測定する。
- ・アーク放電は、IEEE C37.20.7-00713等に基づき、母線に導電性針金をワイヤリングする。

参考図2-3 M/C試験回路

## 2.4 測定項目

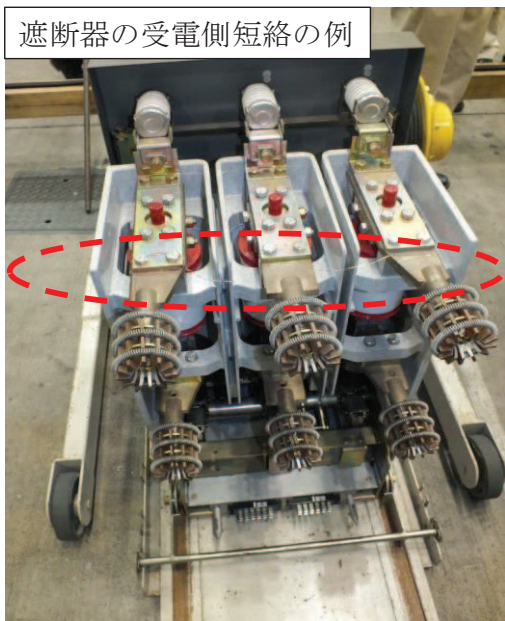
- HEAF試験においては、変流器又は分流器により電流波形を測定し、計器用変圧器(VT2)により電圧波形を測定している。
- 審査ガイドの「(参考-1)その他の測定項目」に記載されている電気盤周囲の熱流束及び電気盤内圧力の測定並びに高速度カメラによる動画撮影等を実施している。

参考表2-5 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 |

## 2.5 アーク放電の発生方法

- 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た。
- 母線に導電性針金をワイヤリングした後、電流を流し三相短絡させてアーク放電を発生させた。



参考図2-4 遮断器の短絡箇所(M/C試験時)



参考図2-5 遮断器の短絡箇所(MCC試験時)



## 2.6 アーク放電の継続時間

- アーク放電の継続時間については、女川2号機で使用している保護継電器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。

参考表2-6 HEAF試験条件及び試験結果(M/Cの例)

| 種類  | 電気盤      | 試験初期の<br>印可電圧 | 試験初期の<br>印可電流 | アーク放電の継続時間<br>(sec) |       | アーク<br>エネルギー<br>(MJ) | アーク火災<br>有無 | 目標とする<br>アークエネルギー<br>(女川2号機の<br>最大値)<br>(MJ) |
|-----|----------|---------------|---------------|---------------------|-------|----------------------|-------------|--|
|     |          |               |               | 設定値                 | 実測値   |                      |             |  |
| M/C | 試験体<br>① | 6.9kV         | 18.9kA        | 0.1                 | 0.103 | 3.09                 | 無           | 24   |
|     |          |               |               | 0.3                 | 0.302 | 8.17                 |             |  |
|     |          |               |               | 0.5                 | 0.527 | 12.9                 |             |  |
|     |          |               |               | 0.5                 | 0.526 | 10.4                 |             |  |
|     |          |               |               | 1.0                 | 1.23  | 24.7                 |             |  |
|     |          |               |               | 1.0                 | 1.23  | 20.3                 |             |  |
|     |          |               |               | 1.0                 | 1.23  | 27.6                 | 有           |  |
|     |          |               |               | 2.0                 | 2.18  | 41.8                 |             |  |
|     |          |               |               | 2.0                 | 2.39  | 44.6                 |             |  |
|     |          |               |               | 1.0                 | 1.23  | 17.7                 | 無           |  |
|     | 試験体<br>② | 8.0kV         | 40.0kA        | 0.2                 | 0.22  | 12.8                 |             |  |
|     |          |               |               | 0.2                 | 0.21  | 8.68                 |             |  |
|     |          |               |               | 0.6                 | 0.63  | 25.3                 |             |  |

## 2.7 HEAF試験の実施

➤ HEAF試験の結果として、以下の結果(一例)が得られた。

参考表2-7 電力中央研究所HEAF試験結果(P/Cの一例)

| 試験番号 | 発弧箇所                                     | 試験電圧 <sup>1)</sup> (V) | 相別 | 試験電流      |              |           |                  | 通電時間 <sup>2)</sup> (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 <sup>3)</sup> (deg) | 測定箇所 | 最大値(kPa) |   | 到達時間 <sup>4)</sup> (ms) |
| 7-4  | フィーダ盤O下段<br>ACB室内<br>一次側端子 <sup>4)</sup> | 504                    | R  | 60.2      | 37.3         | 24.5      | 38.4             | 1.32                   | 25.3         | 18.5          | フィーダ盤O下段<br>正面           | 1.68 | 4.71     | ・燃焼継続せず<br>・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<br>ACB室内<br>一次側端子 <sup>5)</sup> | 504                    | R  | 62.2      | 38.7         | 32.8      | 43.7             | 1.43                   | 20.3         | 18.9          | フィーダ盤P上段<br>正面           | 1.27 | 4.04     | ・燃焼継続せず<br>・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%

参考表2-8 電力中央研究所HEAF試験結果(MCCの一例)

| 試験番号 | 発弧箇所  | 試験電圧 <sup>1)</sup> (V) | 相別 | 試験電流      |              |           |                  | 通電時間 <sup>2)</sup> (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 <sup>3)</sup> (deg) | 測定箇所 | 最大値(kPa) |  | 到達時間 <sup>4)</sup> (ms) |
| 10-1 | 盤Z<br>2段目<br>MCCB<br>一次側                            | 507                    | R  | 47.4      | 29.0         | 14.1      | 1.55             | 0.06                   | 30.3         | 0.90          | 盤Z<br>正面                 | 26.0 | 3.10     | ・0.06sで消弧<br>・正面と背面扉が開放<br>・火災の発生なし<br>・2段目MCCB一次側ケーブルが溶断し、5段目MCCB一次側が溶断         |                         |
|      |   |                        | S  | 54.6      | 30.9         | 15.0      | 1.66             |                        |              |               |                          |      |          |  | 84                      |
|      |   |                        | T  | 42.5      | 26.1         | 9.38      | 1.37             |                        |              |               |                          |      |          |  | 84                      |
| 10-2 | 盤Y<br>7段目<br>MCCBユニット<br>と母線の接続<br>箇所               | 515                    | R  | 53.2      | 23.9         | 21.4      | 11.19            | 0.52                   | 28.0         | 7.56          | 盤Y<br>正面                 | 19.5 | 2.42     | ・正面と背面扉が開放<br>・火災の発生あり<br>・通電開始から7分10秒で消火<br>・1-7段目MCCB一次側ケーブルが溶断<br>・垂直母線の下部が溶断 |                         |
|      |   |                        | S  | 62.8      | 23.7         | 20.6      | 10.61            |                        |              |               |                          |      |          |  | 69                      |
|      |   |                        | T  | 50.3      | 21.6         | 20.8      | 10.22            |                        |              |               |                          |      |          |  | 69                      |
| 10-3 | 盤Z<br>4段目<br>MCCBユニット<br>と母線の接続<br>箇所 <sup>4)</sup> | 515                    | R  | 42.8      | 21.0         | 23.7      | 6.46             | 0.32                   | 23.1         | 4.49          | 盤Z<br>正面                 | 16.7 | 2.82     | ・正面と背面扉が開放<br>・火災の発生なし<br>・4段目MCCB一次側ケーブルが溶断<br>・垂直母線の下部が溶断                      |                         |
|      |   |                        | 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(500Hz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。



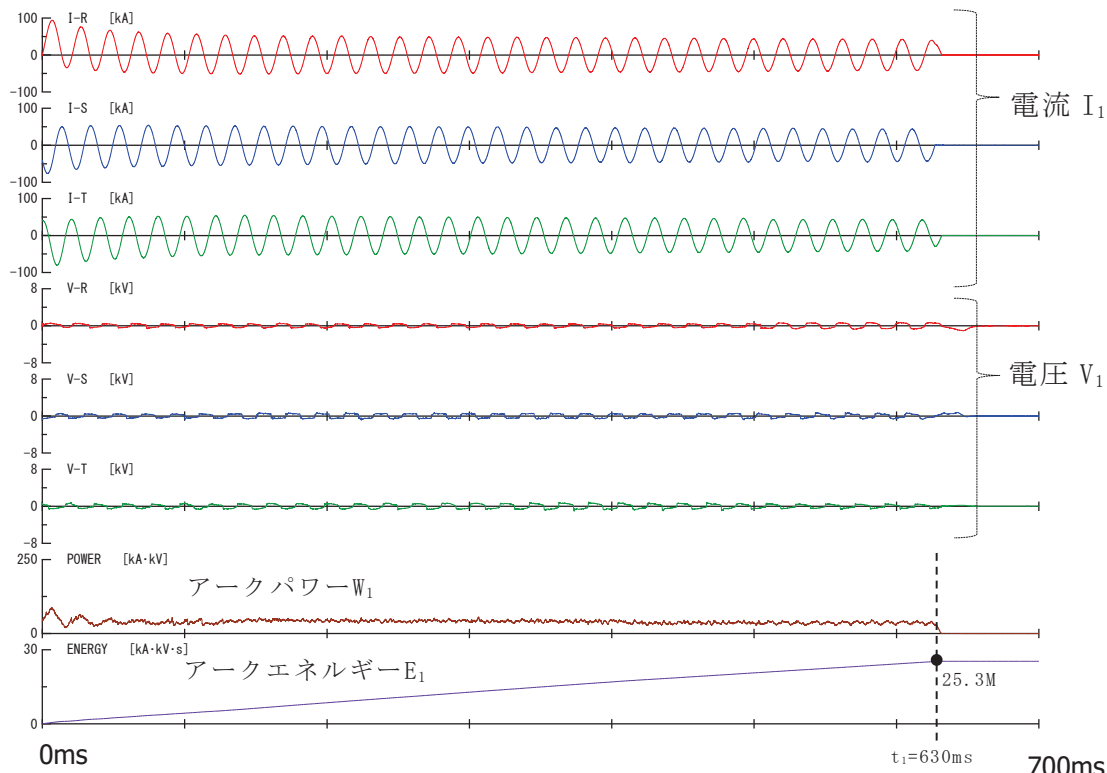
## 2.8 アークエネルギーの計算

- 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。M/Cを例に以下に示す。
- 参考図2-6にM/CのHEAF試験の電圧・電流波形とアークパワー、アークエネルギーの波形を示しており、アークパワーは電圧・電流波形の積により算出している。
- さらに、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。

### アークエネルギーの算出式(M/Cの場合)

$$\begin{aligned}
 E_1 &= \int_0^{t_1} W_1 dt \\
 &= \int_0^{t_1} (V_1 \cdot I_1) dt \\
 &= 25.3[\text{MJ}]
 \end{aligned}$$

$W_1$ : アークパワー  
 $V_1$ : アーク電圧(右図の電圧波形)  
 $I_1$ : アーク電流(右図の電流波形)  
 $t_1$ : アーク放電の継続時間(630ms)



参考図2-6 HEAF試験時の測定波形 (M/C試験時)

## 参考3 アーク火災発生の評価(1/5)

### 3.1 アーク火災発生の評価の概要

- 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。

### 3.2 評価に用いる必要なデータ

- 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。

### 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(1/5)

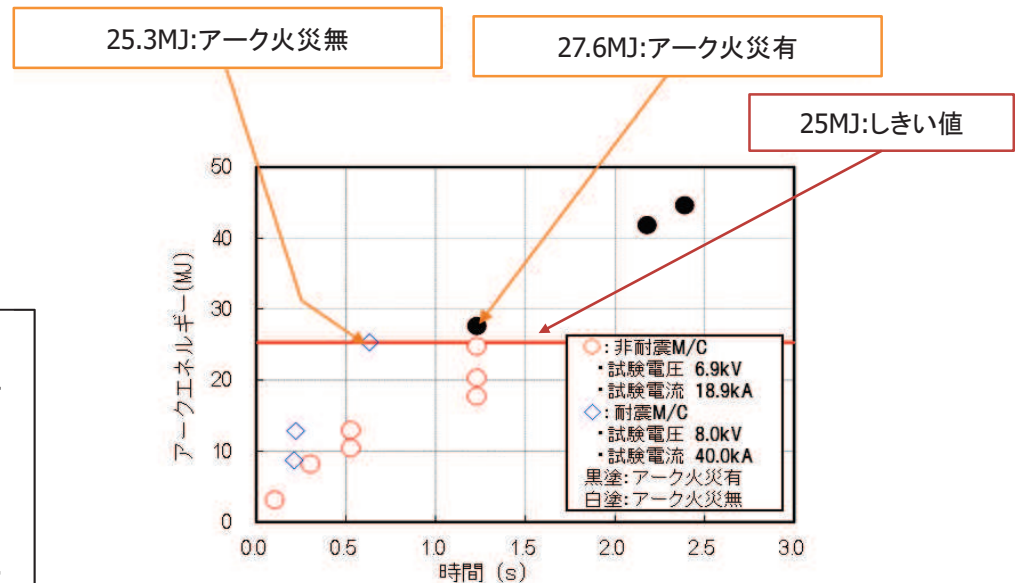
- 審査ガイドを踏まえ、しきい値がHEAF試験においてアーク火災が発生しなかった場合の最大のアークエネルギー値となっていること及びアーク火災が発生した全てのアークエネルギー値を下回っていることを確認する。

#### 試験結果 M/C

- 25.3MJ以下ではアーク火災が起きないことを確認した。
- 本結果を踏まえ、アーク火災発生防止のしきい値を25MJとする。

#### ➤ アーク火災有無の判定

- ・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した結果、盤外には炎は見られなかった。
- ・盤の扉を開けて内部を目視にて直接確認した結果、アーク火災は発生していなかった。



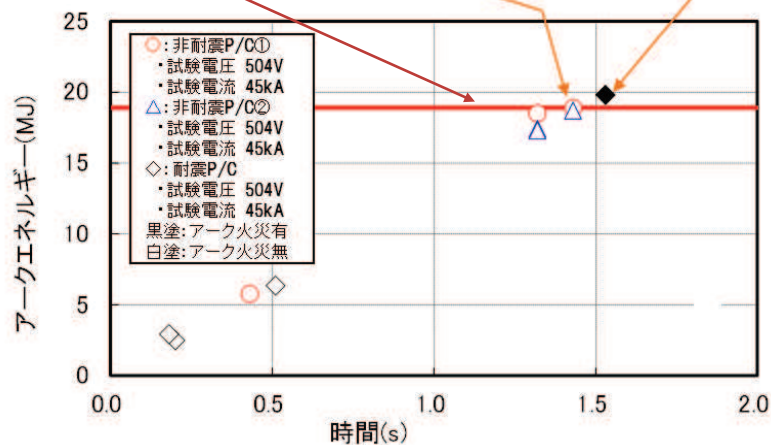
参考図3-1 試験結果(アーク火災発生状況)

## 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(2/5)

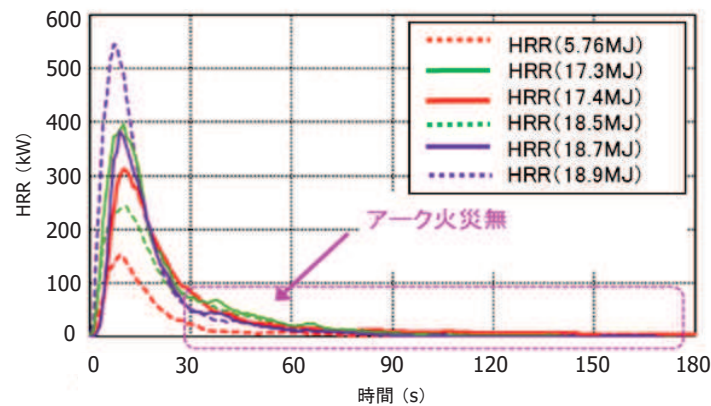
### 試験結果 P/C

- 18.9MJ以下ではアーク火災が起きないことを確認した。
- 本結果を踏まえ、アーク火災発生防止のしきい値を18MJとする。

18MJ:しきい値      18.9MJ:アーク火災無      19.8MJ:アーク火災有



参考図3-2 試験結果(アーク火災発生状況)

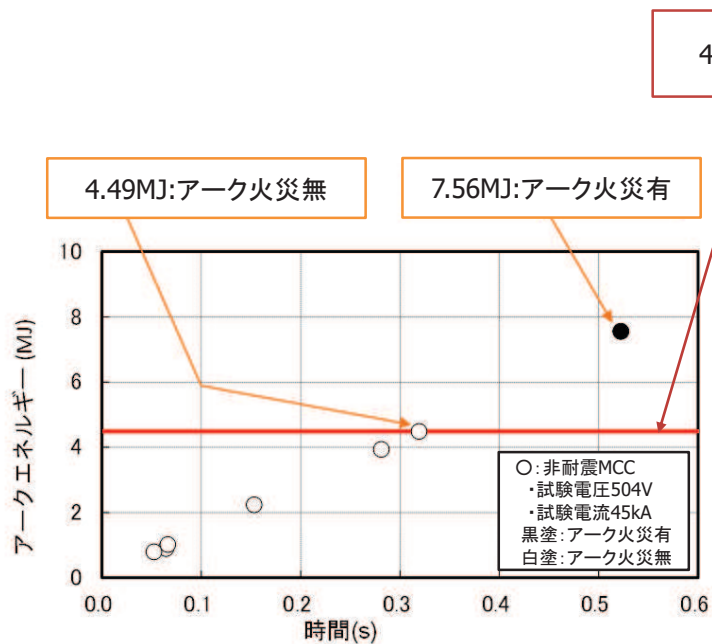


参考図3-3 発熱速度(HRR)測定結果 (P/C試験時)

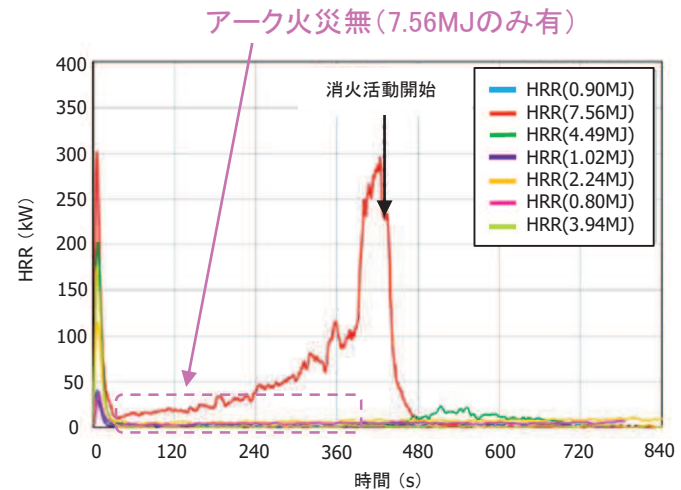
## 3.3 アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値に係る評価(3/5)

### 試験結果 MCC

- 4.49MJ以下ではアーク火災が起きないことを確認した。
- 本結果を踏まえ、アーク火災発生防止のしきい値を4.4MJとする。



参考図3-4 試験結果(アーク火災発生状況)

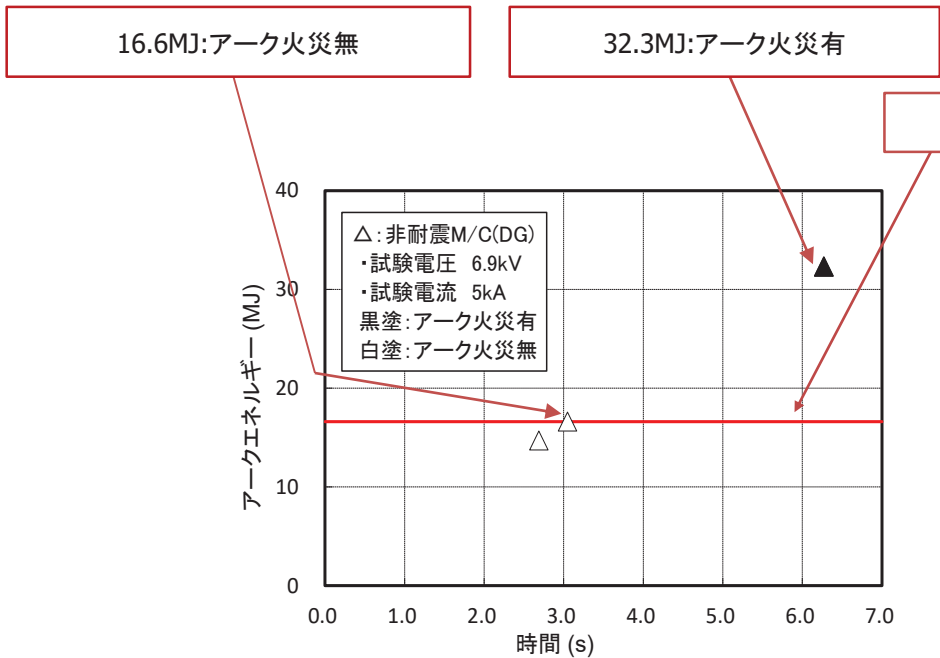


参考図3-5 発熱速度(HRR)測定結果(MCC試験時)

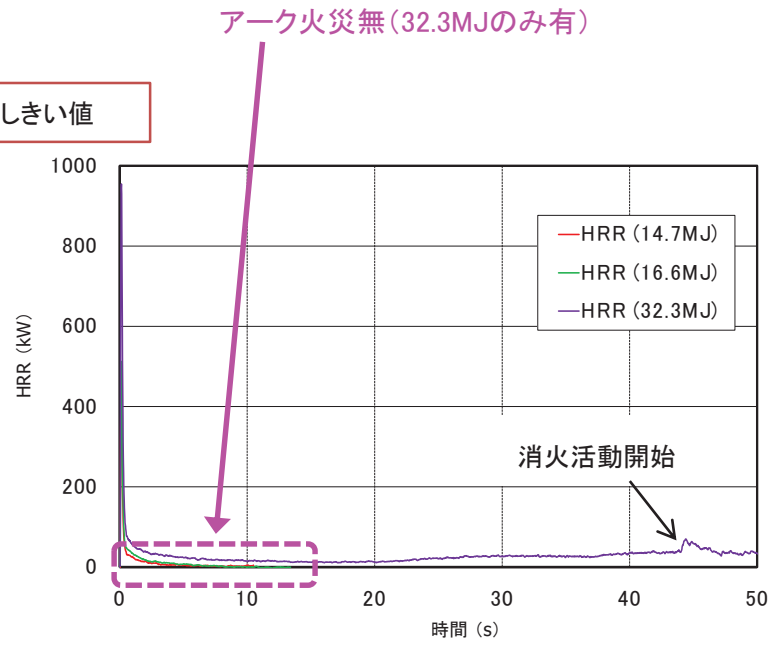
## 3.3 アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値に係る評価(4/5)

**試験結果 M/C(D/G)**

- 16.6MJ以下ではアーク火災が起きないことを確認した。
- 本結果を踏まえ、アーク火災発生防止のしきい値を16MJとする。



参考図3-6 試験結果(アーク火災発生状況)



参考図3-7 発熱速度(HRR)測定結果 (M/C(D/G)試験時)

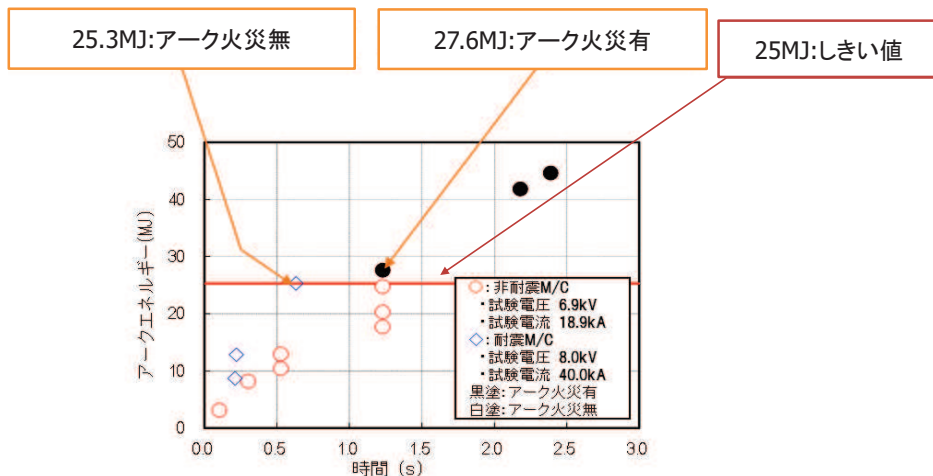
## 3.3 アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値に係る評価(5/5)

➤ 火災発生防止のしきい値の設定に当たっては、保守性として以下の要素を考慮しており、詳細を以下に示す。

### ①アーク火災発生の評価に含まれる誤差

「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。」(審査ガイドより抜粋)ことから、火災が発生しなかった最大のアークエネルギーは、真のしきい値に対して保守性を有している。

また、試験にて火災が発生した最小のアークエネルギーでは、いずれも盤内での火災にとどまっており、隣接盤へ延焼しておらず、電気盤の損傷の拡大の観点では、保守的な判定をしている。



参考図3-8 M/Cのしきい値

### ②アークエネルギーの測定誤差

参考表3-1の通り最大のアークエネルギーに対して、保守性としてそれぞれの測定誤差を考慮した上で、更に端数を切り捨てて、しきい値を設定している。

参考表3-1 アークエネルギーの測定誤差

|          | ①アーク火災が発生しなかった最大のアークエネルギー(MJ) | 測定誤差(%) | 測定誤差を含む①の値(MJ) | しきい値(MJ) |
|----------|-------------------------------|---------|----------------|----------|
| M/C      | 25.3                          | 0.8     | 25.09          | 25       |
| P/C      | 18.9                          | 0.6     | 18.78          | 18       |
| MCC      | 4.49                          | 0.6     | 4.46           | 4.4      |
| M/C(D/G) | 16.6                          | 0.8     | 16.46          | 16       |

### 4.1 アーク放電の遮断時間の設定(1/2)

- HEAF対策が必要な電気盤に発生するアークエネルギーがしきい値以下となるよう、アーク放電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アーク放電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。

$$\begin{aligned} \text{アークエネルギー } E_{3\phi} &= V_{arc} \times I_{arc} \times t_{arc} \\ &= 0.9 \times V_{arc} \times I_{rms} \times t_{arc} \end{aligned}$$

$E_{3\phi}$  : 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

$t_{arc}$  : アーク発生時のアーク放電の遮断時間

#### 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試験の結果の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回路インピーダンス%Z(発電機, 変圧器を含む。)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。

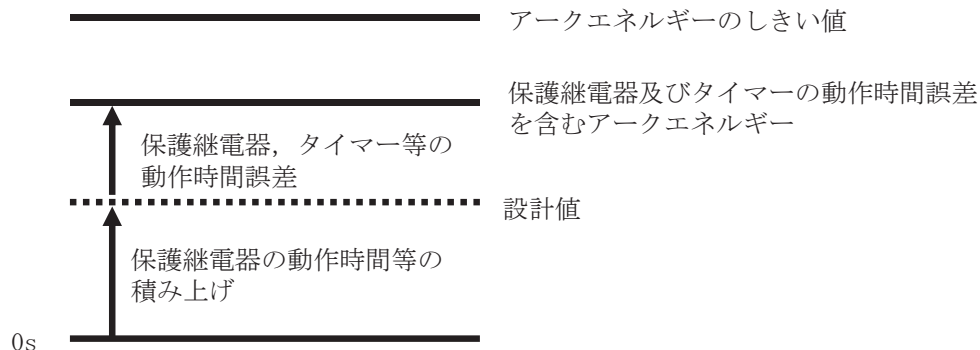
$$\text{短絡電流[A]} = \frac{\text{基準容量[VA]}}{\sqrt{3} \times \text{基準電圧}} \times \frac{100}{\%Z}$$



## 4.1 アーク放電の遮断時間の設定(2/2)

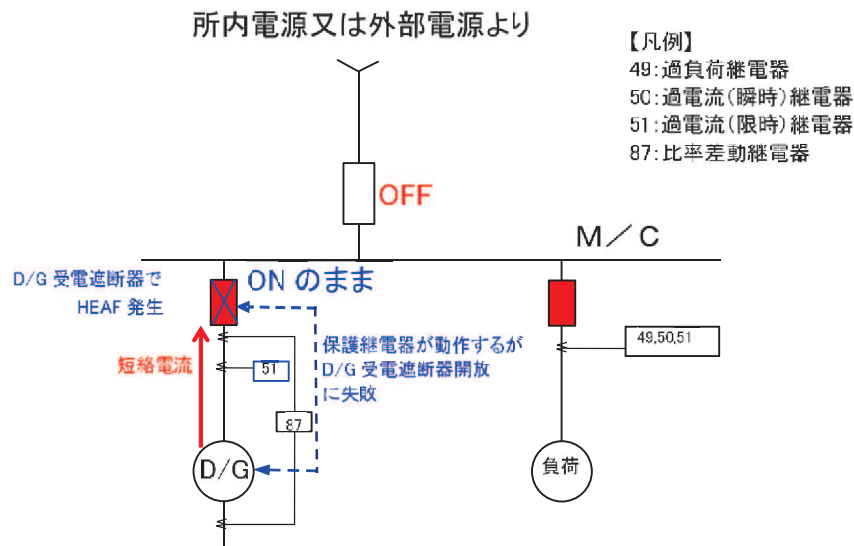
### c. アーク放電の遮断時間について

- 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(参考図4-1参照)。



参考図4-1 アーク放電の遮断時間イメージ

- M/C(D/G)については、D/Gから非常用母線へ給電中にD/G受電遮断器でHEAFが発生した場合、D/G受電遮断器とD/Gの間にアーク放電を遮断するための遮断器がないことから、D/Gの保護継電器によりD/Gの発電を停止し、D/Gからの給電が停止するまでの期間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(参考図4-2参照)。

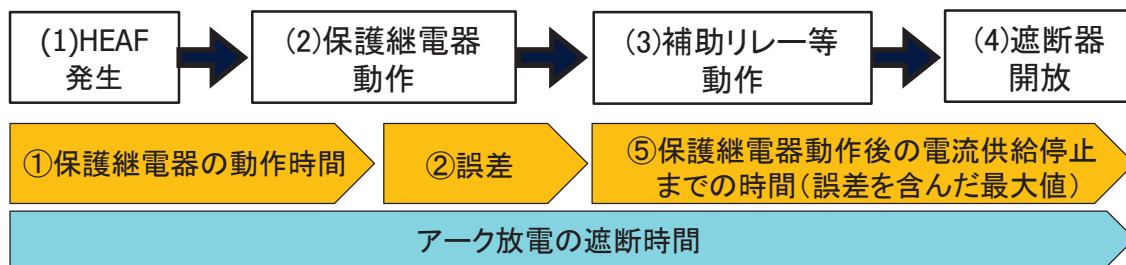


参考図4-2 D/G受電遮断器でHEAFが発生した場合のイメージ

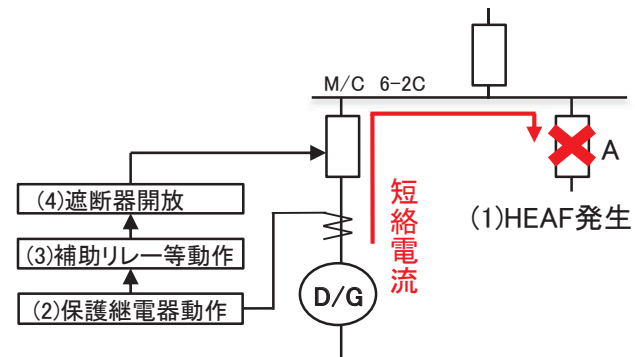


## 4.2 遮断器の遮断時間の設定における保護継電器等の動作時間の誤差の考え方(1/2)

- 遮断器AでHEAFが発生してから遮断器開放によるアーク放電遮断までの一連の動作の例を参考図4-3及び4-4に示す。
- 保護継電器の動作時間を適切な時間に設計することにより、発生するアークエネルギーをアークエネルギーのしきい値以下にする。



参考図4-3 HEAF発生から遮断器開放までの動作に含まれる誤差



A: M/C 6-2Cに接続される遮断器  
(非常用ディーゼル発電機(A)受電遮断器52-6-2DGAを除く。)

参考図4-4 HEAF発生から遮断器開放までの動作

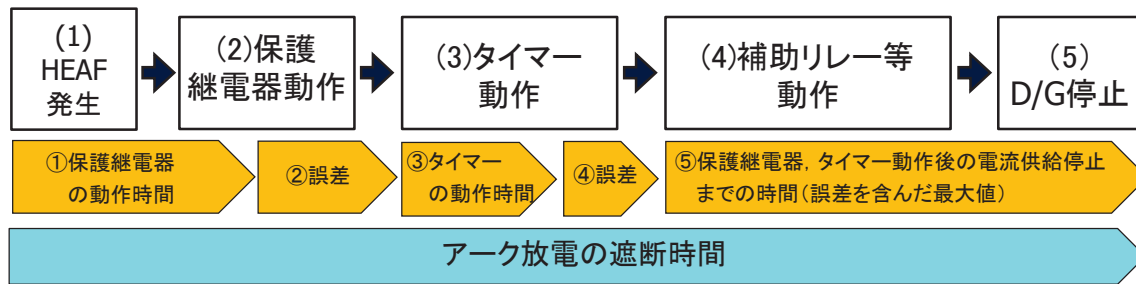
参考表4-1 HEAF発生から遮断器開放までの時間とアークエネルギー

| HEAF発生箇所  |   | ①保護継電器の動作時間(sec) | ②誤差(sec) | ③保護継電器動作後の電流供給停止までの時間(sec) | ①+②+③電流の遮断時間(sec) | アークエネルギー(MJ) | アークエネルギーのしきい値(MJ) |
|-----------|---|------------------|----------|----------------------------|-------------------|--------------|-------------------|
| M/C (D/G) | A |                  |          |                            |                   |              | 16                |

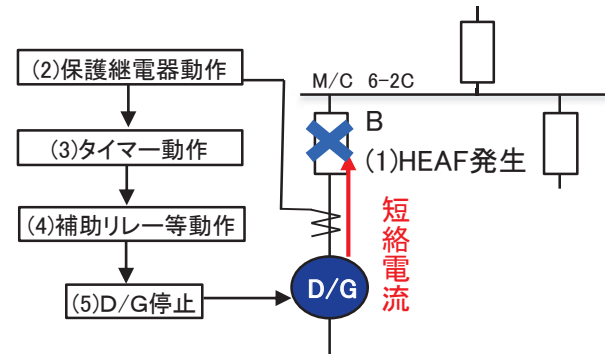
A: M/C 6-2Cに接続される遮断器  
(非常用ディーゼル発電機(A)受電遮断器52-6-2DGAを除く。)

## 4.2 遮断器の遮断時間の設定における保護継電器等の動作時間の誤差の考え方(2/2)

- 遮断器BでHEAFが発生してからD/G停止によるアーク放電遮断までの一連の動作の例を参考図4-5及び4-6に示す。
- 保護継電器とタイマーの動作時間を適切な時間に設計することにより、発生するアークエネルギーをアークエネルギーのしきい値以下にする。



参考図4-5 HEAF発生からD/G停止までの動作に含まれる誤差



B: 非常用ディーゼル発電機(A)受電遮断器52-6-2DGA

参考図4-6 HEAF発生からD/G停止までの動作

参考表4-2 HEAF発生から遮断器開放までの時間とアークエネルギー

| HEAF発生箇所    | 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誤差(sec) | 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(sec) | ①+②+③+④+⑤電流の遮断時間(sec) | アークエネルギー(MJ) | アークエネルギーのしきい値(MJ) |
|-------------|------------------|----------|-----------------|----------|----------------------------------|-----------------------|--------------|-------------------|
| M/C (D/G) B |                  |          |                 |          |                                  |                       |              | 16                |

B: 非常用ディーゼル発電機(A)受電遮断器52-6-2DGA

## 5.1 D/G停止のための回路構成について

### 【既設インターロック】

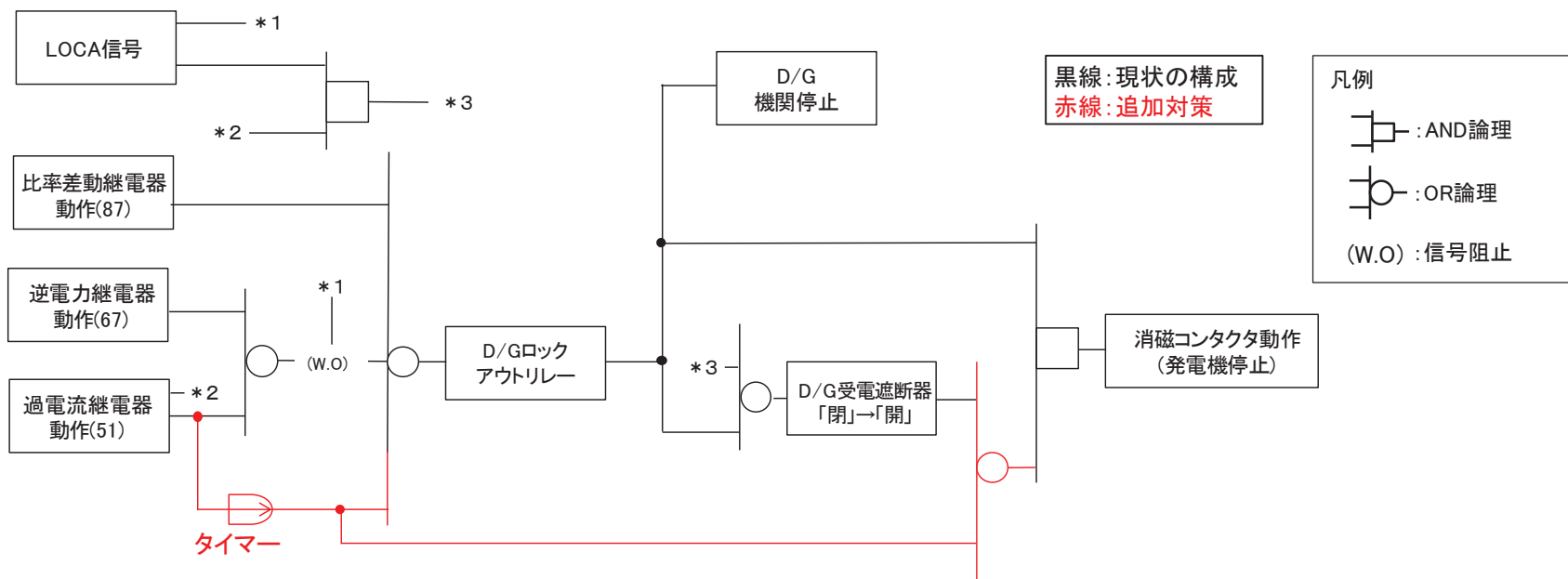
- LOCA発生時にD/G側の過電流継電器(51)(以下「D/G 51」という。)が動作した場合は、D/Gは停止せず、D/G受電遮断器が「開」となる。LOCA時以外にD/G 51が動作した場合は、D/Gが停止し、D/G受電遮断器が「開」となる。

### 【既設インターロックでHEAFが発生した場合の動作】

- LOCA発生時にD/G受電遮断器でHEAFが発生した場合はD/G受電遮断器が「開」動作できないことから、D/Gからの給電が継続され、アーク火災が発生する恐れがある。
- LOCA時以外にD/G受電遮断器でHEAFが発生した場合は、D/G 51からの信号によりD/Gは停止するが、HEAF発生によりD/G受電遮断器が「開」動作できないことから、消磁コンタクタが動作せず、D/Gからの給電が継続され、アーク火災が発生する恐れがある。

### 【HEAF対策】

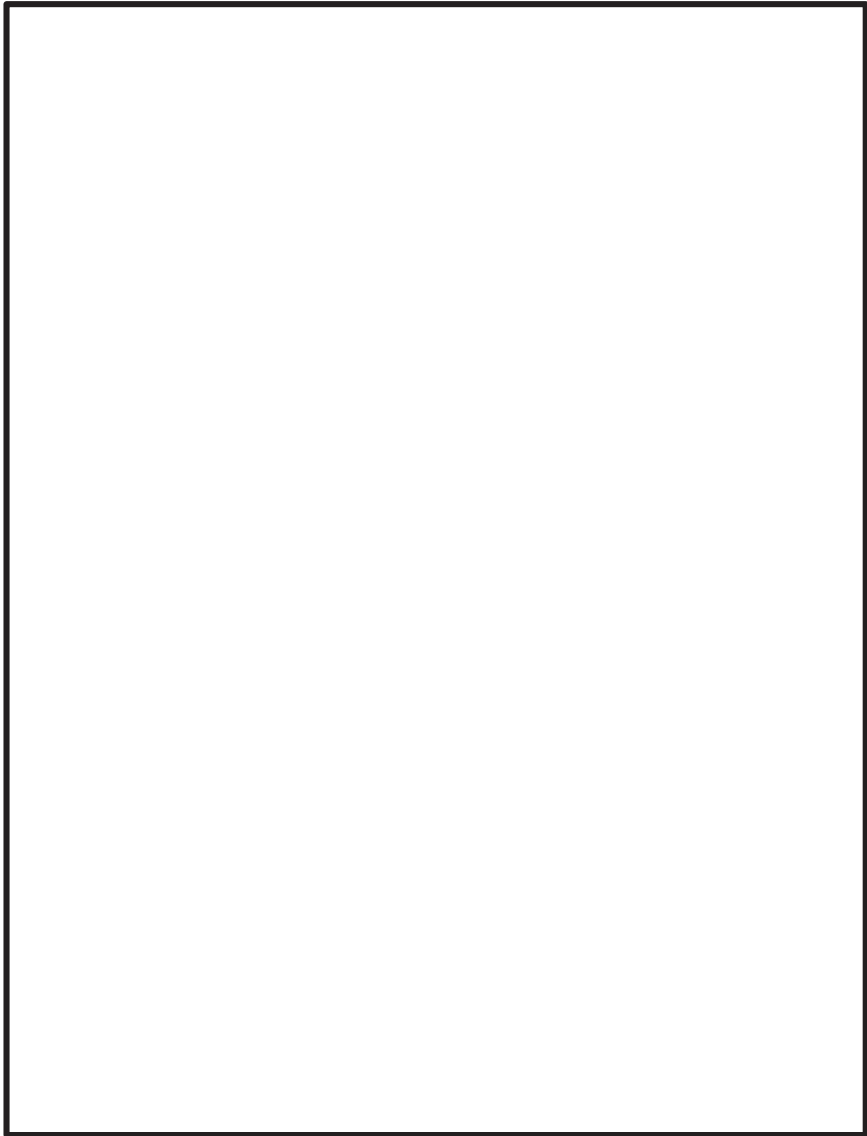
- D/G受電遮断器でHEAFが発生した場合、HEAF発生に起因した短絡電流を早期に検出しD/Gを停止するため、D/G 51とタイマーの動作によりD/Gのロックアウトリレー及び消磁コンタクタ動作とするインターロックを追加する。



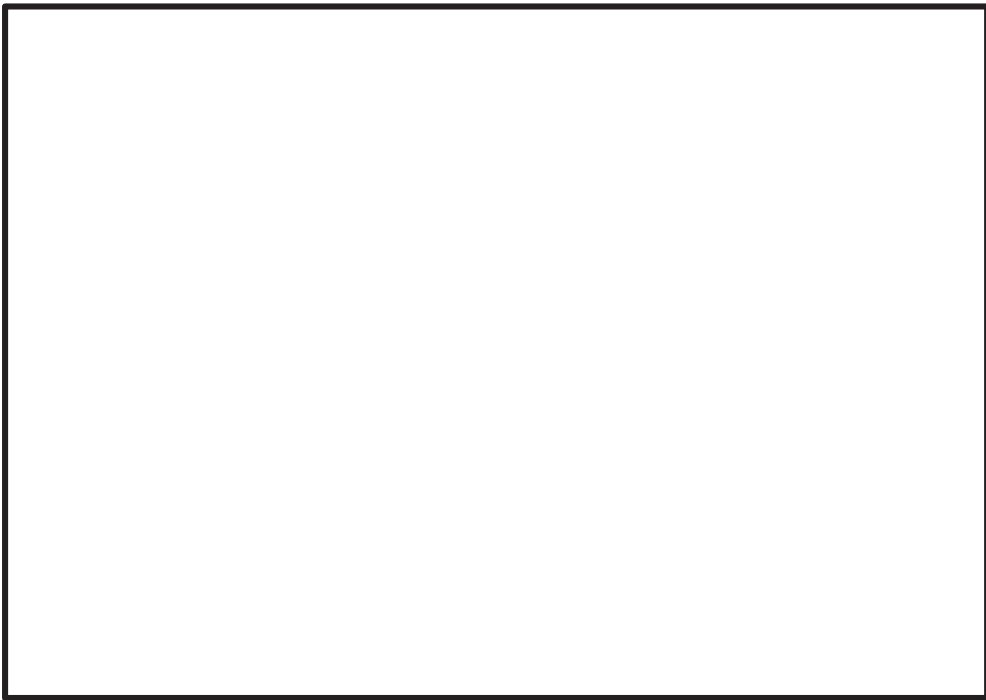
参考図5-1 HEAF対策後のD/Gインターロック図

## 5.2 タイマーの時間設定

- タイマーは、D/Gの外部故障時にはタイマー設定値以内にD/G受電遮断器を開放し短絡電流を遮断することで不要なD/G停止を回避すると共に、D/G受電遮断器にてHEAFが発生した場合にはアーク火災発生前までにD/Gを停止させるよう、タイマーの時間を1[sec]に設定する(下例参照)。



- タイマーの設定時間を1[sec]とすると、D/G(A)の短絡減衰曲線は参考図5-4のようになり、アーク火災の発生前までにD/Gからの短絡電流を停止させることができる。



参考図5-4 D/G(A)の短絡電流減衰曲線

### 5.3 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

- ▶ 変更する過電流継電器(51)による影響を踏まえ、関連するD/Gの基準適合性に対して、悪影響を及ぼすことがないように、以下を考慮する。

#### ○「多重性, 多様性及び位置的分散」, 「悪影響防止」について

- ・D/Gに対する, 多重性及び独立性をもつ設計, 機器等の破断・損壊に伴う飛散物により安全性を損なうことのない設計に, 変更する過電流継電器(51)が影響を及ぼさないよう, 既存の保護継電器と同様にD/G制御盤内に設置する。
- ・過電流継電器(51)の故障によってD/Gの安全機能が阻害されることがないように, 運転管理による監視, 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, 保守管理による計画的な点検及び故障時の早期復旧作業が可能となるよう考慮する。

#### ○「環境条件等」について

- ・過電流継電器(51)の変更によっても, 地震, 火災, 溢水及びその他の自然現象による他設備からの悪影響により, D/Gの安全機能を損なわせることがない設計とする。

# 参考6 先行審査プラントと女川2号機のHEAF対策比較

参考表6-1 先行審査プラントと女川2号機のHEAF対策比較

|               | 女川2号機   | 先行審査プラント(BWR)   | 先行審査プラント(PWR)   |
|---------------|---|---|---|
| <p>ブロック図</p>  |   |   |   |
| <p>単線結線図</p>  |   |   |   |
| <p>HEAF対策</p> | <p>・既設の過電流継電器(51)にタイマーを追加し、タイマーが一定時間動作継続した場合には、D/G受電遮断器でHEAFが発生していると捉え、D/G停止及び消磁コンタクト投入のインターロックを動作させることで、アーク火災への進展を防止する。</p> <p>・女川2号機の場合は、既設の過電流継電器(51)を流用することで、<b>設計思想*を変更せずに対策が可能である。</b></p> <p>注記* : 過電流継電器(51)が動作した場合、LOCA発生時はD/Gが停止せず、D/G受電遮断器が「開」となる。LOCA時以外はD/Gが停止し、D/G受電遮断器が「開」となる。</p> | <p>・既設の過電流継電器(51)にタイマーを追加し、タイマーが一定時間動作継続した場合には、D/G受電遮断器でHEAFが発生していると捉え、D/G停止及び消磁コンタクト投入のインターロックを動作させることで、アーク火災への進展を防止する。</p> <p>・先行審査プラント(BWR)の場合は、既設の過電流継電器(51)を流用することで、<b>設計思想*を変更せずに対策が可能である。</b></p> <p>注記* 過電流継電器(51)が動作した場合、D/Gが停止せず、D/G受電遮断器が「開」となる。</p> | <p>・過電流継電器(50)を追加し、過電流継電器(50)動作した場合には、D/G受電遮断器でHEAFが発生していると捉え、D/G停止及び消磁コンタクト投入のインターロックを動作させることで、アーク火災への進展を防止する。</p> <p>・先行審査プラント(PWR)の場合は、既設の過電流継電器(51)を使用するためには、<b>設計思想*を変更する必要がある。</b></p> <p>注記* : 過電流継電器(51)が動作した場合、SI信号挿入状態においては、D/Gが停止せず、D/G受電遮断器が「開」とならない。</p> |

# 参考7 消磁コンタクトの構造, 動作原理について(1/2)

参考表7-1 消磁コンタクト回路図

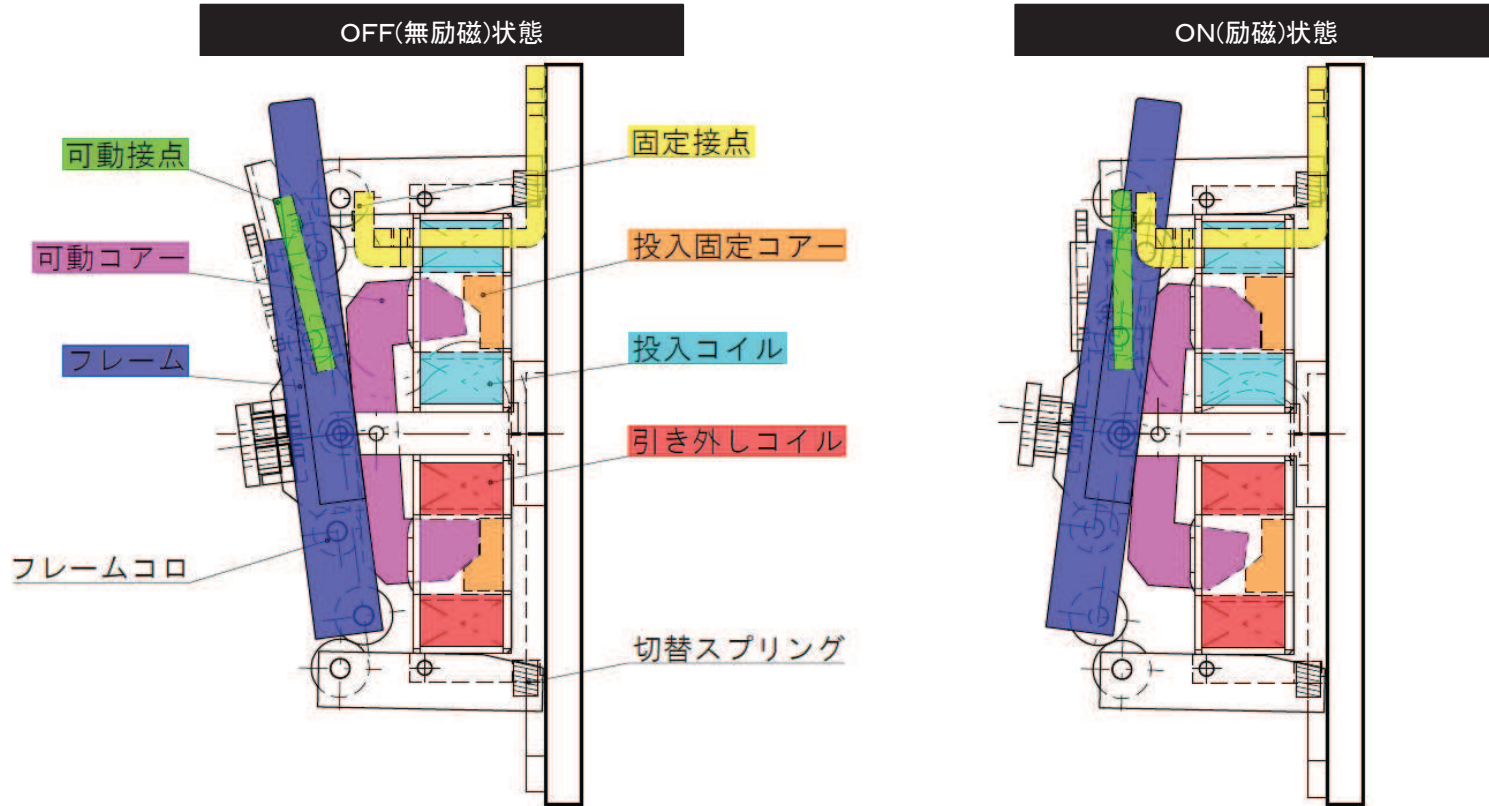
【凡例】

黒線: 停電部 赤線: 充電部

|      | D/G起動時                                   | D/G運転中  | 消磁コンタクト投入時  |
|------|--|---|---|
| 回路図  |  |   |   |
| 動作概要 | <p>・D/G起動時はDC125V電源から発電機界磁巻線に電流供給する。</p> | <p>・D/Gが起動完了すると初期励磁コンタクトが開放し、DC125V電源からの供給は停止し、発電機から電流供給する。</p> | <p>・消磁コンタクトが投入されると、シリコン整流器入力側の三相回路が短絡され、その短絡部に電流が流れ込むため、発電機界磁巻線への電流供給が停止し、発電機の回転磁界が減衰する。従って、D/G機関停止とともに消磁コンタクトが投入されれば、短絡電流は急速に減衰する。</p> |



## 参考7 消磁コンタクタの構造, 動作原理について(2/2)



参考図7-1 アーク火災発生のメカニズム

### <消磁コンタクタの動作原理>

- 消磁コンタクタは投入コイル, 投入固定コア, 可動コアで構成される電磁石と負荷電流を入・切(ON・OFF)するための固定接点, 可動接点等の主要部品で構成されている。
- OFF(無励磁)状態では引き外しコイル等により固定接点と可動接点は開離しており, 電流が流れない状態となっている。
- 投入コイルを励磁すると, 可動コアが投入固定コアに吸引され, 可動コアがフレームコロとフレームを押し上げる。そして, フレームに連結した可動接点が固定接点に接触して回路が閉じ, ON(励磁)状態となる。

### <消磁動作の説明>

- 上記の原理にて, 消磁コンタクタがON(励磁)して界磁回路を短絡すると, 発電機の励磁が停止する。



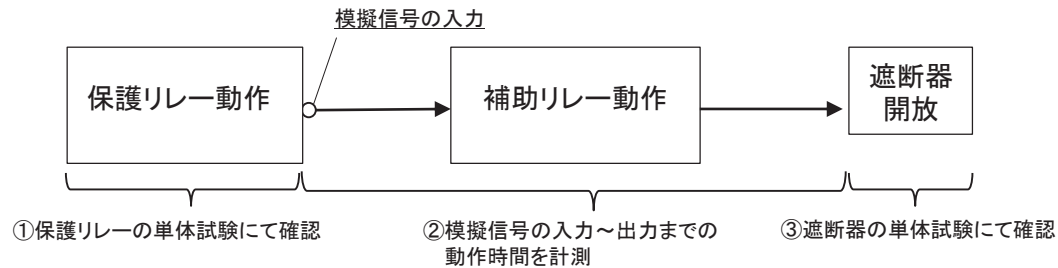
## 参考8 D/G機関の停止による短絡電流供給停止までの代替検査について

- 技術基準規則第15条第2項への適合に対する設計の考え方については以下のとおり。

### 【参考】技術基準規則第15条第2項

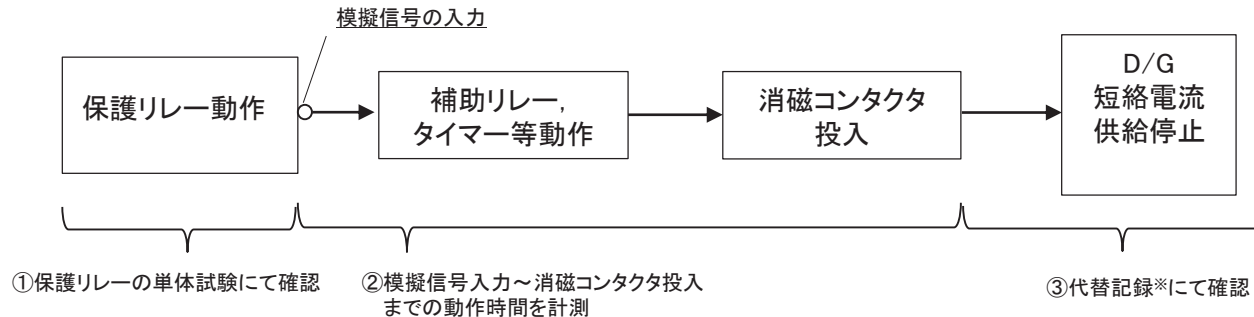
設計基準対象施設は、その健全性及び能力を確認するため、発電用原子炉の運転中又は停止中に必要な個所の保守点検（試験及び検査を含む。）ができるよう、施設しなければならない。

#### ▶ パターン1（M/Cに接続される遮断器（D/G受電遮断器以外）でのHEAF時）



参考図8-1 M/Cに接続される遮断器（D/G受電遮断器以外）でのHEAF時

#### ▶ パターン2（D/G受電遮断器でのHEAF時）



※：実機にて短絡状態からD/G停止までの実電流測定ができないため、メーカーの解析結果を用いて代替する。

参考図8-2 D/G受電遮断器でのHEAF時

- パターン1については、既工認と同様の検査方法であり、実測にて①、②、③を測定する。
- パターン2については、①、②の範囲については実測できるが、③についてはプラント安全上の観点から実測できないため、メーカーの解析結果を用いて代替する。