東海第二発電所
高エネルギーアーク損傷（HEAF）対策に係る
設計及び工事計画認可申請について

2025年4月10日
日本原子力発電株式会社

本資料のうち，□は商業秘密又は核物質防護上の観点から公開できません。

○目　次

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改正内容と対応方針

2．高エネルギーアーク損傷（HEAF）対策の概要

3．今回の設計及び工事計画認可申請の概要

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東海第二発電所のHEAF対策比較
参考７　界磁開閉器（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．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。また，「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。）が制定された。技術基準規則への対応方針を表1に示す 。
- 今回の設工認申請において，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対策が必要な電気盤（非常用ディーゼル発電機又は高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機（以下「D/G」という。）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）（下線は改正部分）

改正後	改正前	対応方針
（保安電源設備） 第四十五条【略】 2 【略】	（保安電源設備） 第四十五条【略】 2 【略】	
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、第一項の電線路、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。	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、第一項の電線路、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、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を講じなければならない。	審査ガイドを踏まえ，実証試験により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「しきい値」という。）を求め，実機においてHEAF対策が必要なものについて対策を実施する。 本対策の実施は，基本設計方針の変更が必要であるため，設計及び工事計画認可申請を行う。
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	（号を加える）	
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	（号を加える）	
4～8【略】	4～8【略】	

➢ 今回の設工認申請においては，非常用電源設備の基本設計方針に，HEAF対策に係る記載を追加する。具体的な記載の追加内容を表2に示す。

表2 非常用電源設備の基本設計方針（抜粋）（下線は記載追加部分）

1．非常用電源設備の電源系統

1.1 非常用電源系統

重要安全施設においては，多重性を有し，系統分離が可能である母線で構成し，信頼性の高い機器を設置する。非常用高圧母線（メタルクラッド開閉装置で構成）は，多重性を持たせ，3系統の母線で構成し，工学的安全施設に関係する高圧補機と発電所の保安に必要な高圧補機へ給電する設計とする。また，動力変圧器を通して降圧し，非常用低圧母線（パワーセンタ及びモータコントロールセンタで構成）へ給電する。非常用低圧母線も同様に多重性を持たせ3系統の母線で構成し，工学的安全施設に関係する低圧補機と発電所の保安に必要な低圧補機へ給電する設計とする。

また，高圧及び低圧母線等で故障が発生した際は，遮断器により故障箇所を隔離できる設計とし，故障による影響を局所化できるとともに，他の安全施設への影響を限定できる設計とする。

さらに，非常用所内電源系からの受電時の母線切替操作が容易な設計とする。

<u>加えて，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(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，遮断器の遮断時間の適切な設定，非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。）の停止等により，高エネルギーのアーク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する。</u>

これらの母線は，独立性を確保し，それぞれ区画分離された部屋に配置する設計とする。

原子炉緊急停止系並びに工学的安全施設に関係する多重性を持つ動力回路に使用するケーブルは，負荷の容量に応じたケーブルを使用し，多重化したそれぞれのケーブルについて相互に物理的分離を図る設計とするとともに制御回路や計装回路への電気的影響を考慮した設計とする。

2.1 アーク火災発生のメカニズム

- アーク火災発生のメカニズムを図1に示す。
  (1) 電気盤において，短絡によりアーク放電が発生する。
  (2) 急激な圧力上昇を伴う高温ガスが発生する。圧力上昇により高温ガスは開口部等から抜け，圧力は低下する。
  （HEAFの発生）
  (3) 一部の高温ガスがアーク放電の発生箇所に滞留してアーク放電が継続し，高温ガスから可燃物にエネルギーが伝播する。
  (4) 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。

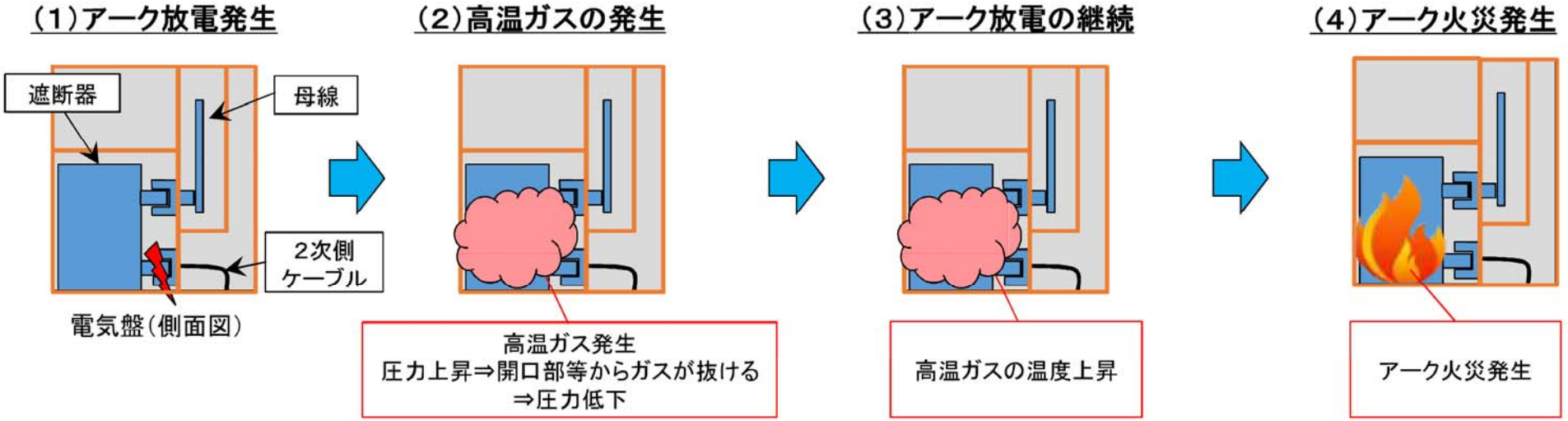


図1 アーク火災発生のメカニズム

2.2 HEAF対策の概要

➢ HEAF対策を実施するための対応項目を表3に示す。

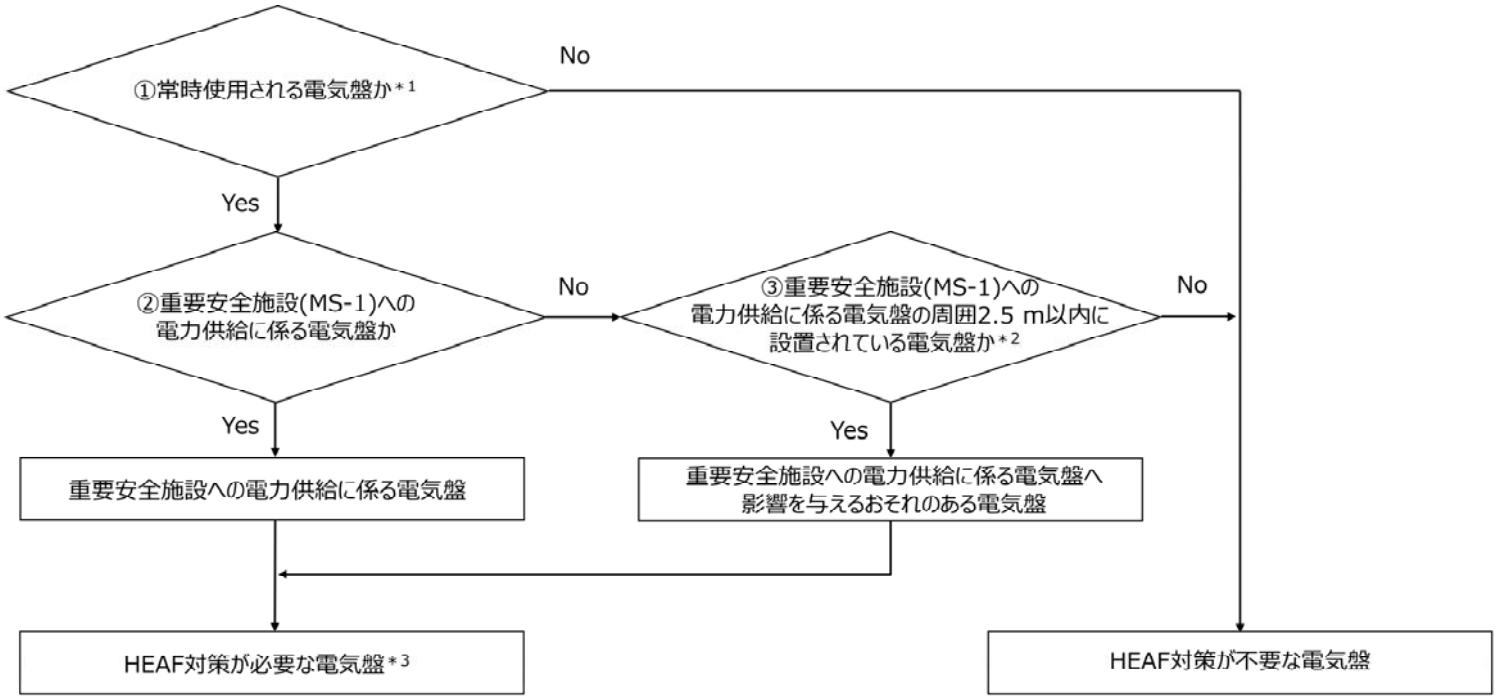
表3 HEAF対策の対応項目

対応方針	頁
2.3 HEAF対策が必要な電気盤	7，8
2.4 アーク放電を発生させる試験	9
2.5 アーク火災発生の評価	10
2.6 HEAFに係る対策の判断基準	11
2.7 D/Gからの給電時以外のHEAF対策	12
2.8 D/Gからの給電時のHEAF対策	13，14
2.9 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	15～22

2.3 HEAF対策が必要な電気盤

- HEAF対策が必要な電気盤は，技術基準規則の解釈第45条（保安電源設備＊）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，「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12条第11項においてクラスMS-1に分類される「原子炉の緊急停止機能」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表4参照）。
- 上記を基に，図2のフローにて保安電源設備のうちHEAF対策が必要な電気盤を抽出した。

注記＊：安全施設へ電力を供給するための設備

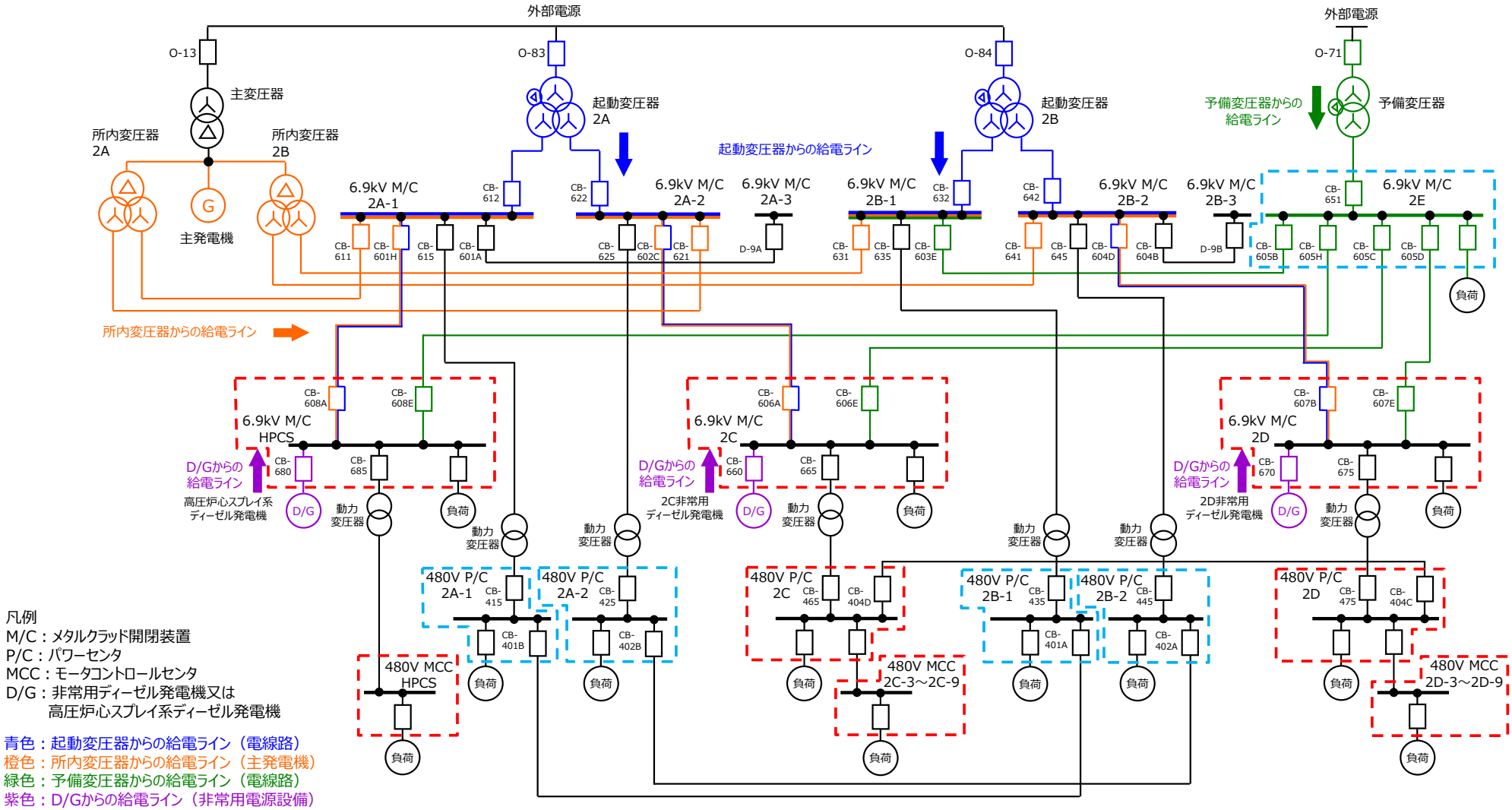


注記 ＊1：電線路，主発電機又は非常用電源設備から電気が供給されている電気盤をいう。
＊2：審査ガイドによる。
＊3：短絡などが発生した場合，非常に短時間（0.1秒以下）で電気盤への電力供給を止めることができる場合，適切に遮断されていると判断し，HEAF対策ができているものとする。

図2　HEAF対策が必要な電気盤の抽出フロー図

2．高エネルギーアーク損傷（HEAF）対策の概要

➢ 抽出フローに従い，保安電源設備のうちHEAF対策が必要な電気盤を選定した結果を図3に示す。



凡例
M/C：メタルクラッド開閉装置
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又は
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機

青色：起動変圧器からの給電ライン（電線路）
橙色：所内変圧器からの給電ライン（主発電機）
緑色：予備変圧器からの給電ライン（電線路）
紫色：D/Gからの給電ライン（非常用電源設備）

：HEAF対策が必要な電気盤
（重要安全施設への電力供給に係る電気盤）
：HEAF対策が必要な電気盤
（重要安全施設への電力供給に係る電気盤へ影響を与えるおそれのある電気盤）

図3　東海第二発電所　電気盤系統図

2.4 アーク放電を発生させる試験

➢ 審査ガイドを踏まえて，表4のとおりに対応し，HEAF試験を実施した。

表4 HEAF試験の実施に係る審査ガイドへの対応内容

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 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（以下「実機」という。）と同等の電気盤を選定した。	参考2 P30～P33
2．2 短絡電流の目標値	試験時の短絡電流値，印加電圧は，実機の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 P34
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 P35
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 P35
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 P36
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 P37
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 P38
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 P39

2.5 アーク火災発生の評価

➢ 審査ガイドを踏まえて，表5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5 アーク火災発生の評価に係る審査ガイドへの対応内容

審査ガイド	対応内容	記載箇所
3 アーク火災発生の評価 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 P40
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 P40
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 P40～P44
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6に示す。

表6 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

2.6 HEAFに係る対策の判断基準

➢ 審査ガイドを踏まえて，表7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7 HEAF対策の判断基準に係る審査ガイドへの対応内容

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。	P15～P22 参考４ P45～P48

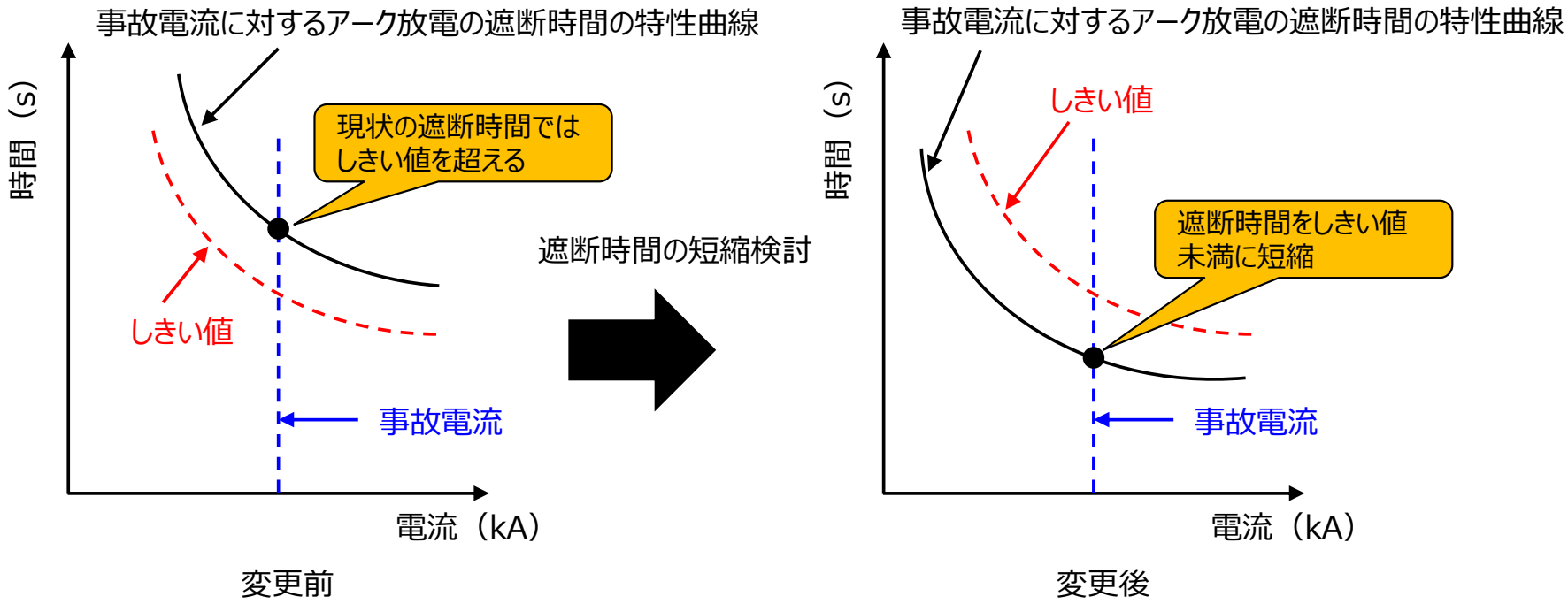


図4 アーク放電の遮断時間変更イメージ

2.7 D/Gからの給電時以外のHEAF対策

- 図5のM/C 2D母線の遮断器③でHEAFが発生した場合，上流の遮断器①により，遮断器④でHEAFが発生した場合，上流の遮断器②により短絡電流を遮断する。
- 遮断器①及び遮断器②の遮断時間は，過電流継電器等の誤差を考慮したうえでM/Cのしきい値（25 MJ）を下回るように設定する。
- 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，遮断器による短絡電流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。

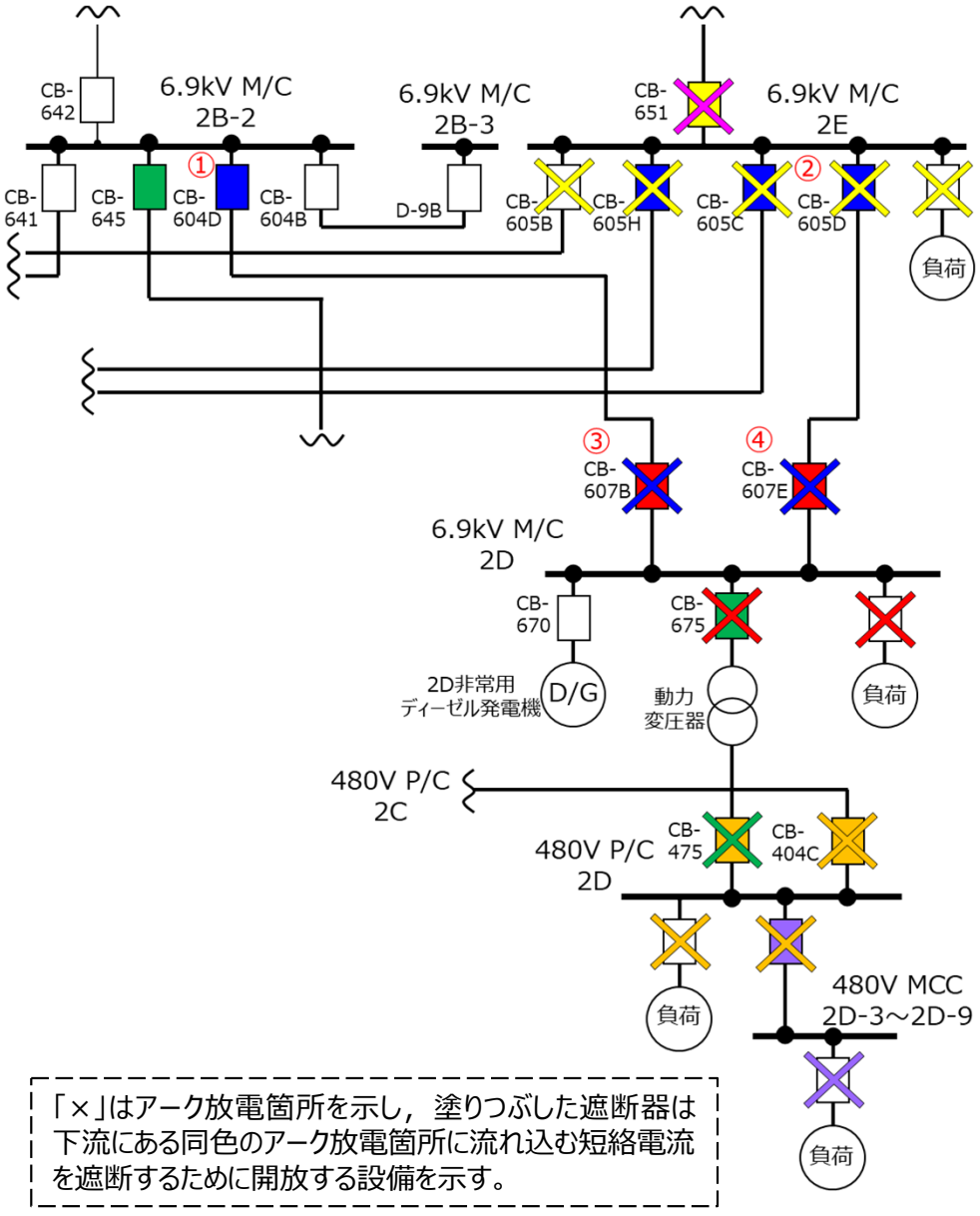
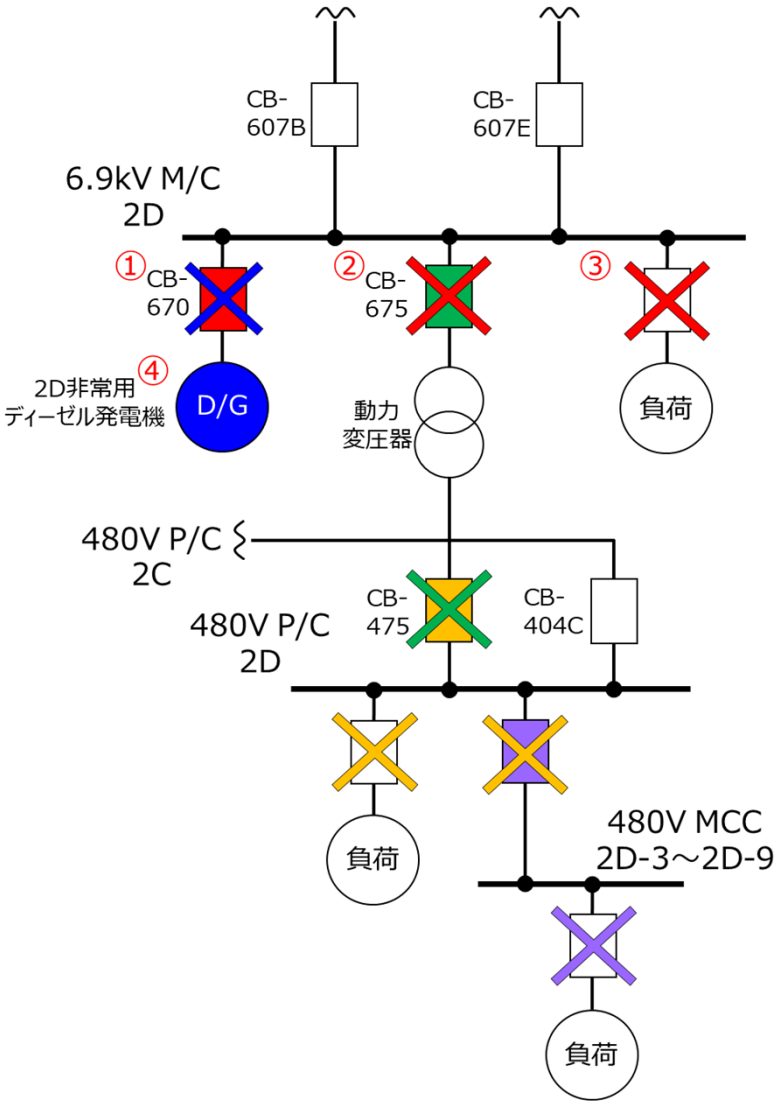


図5 東海第二発電所 非常用電源D系統の例（D/Gからの給電時以外）

2.8 D/Gからの給電時のHEAF対策

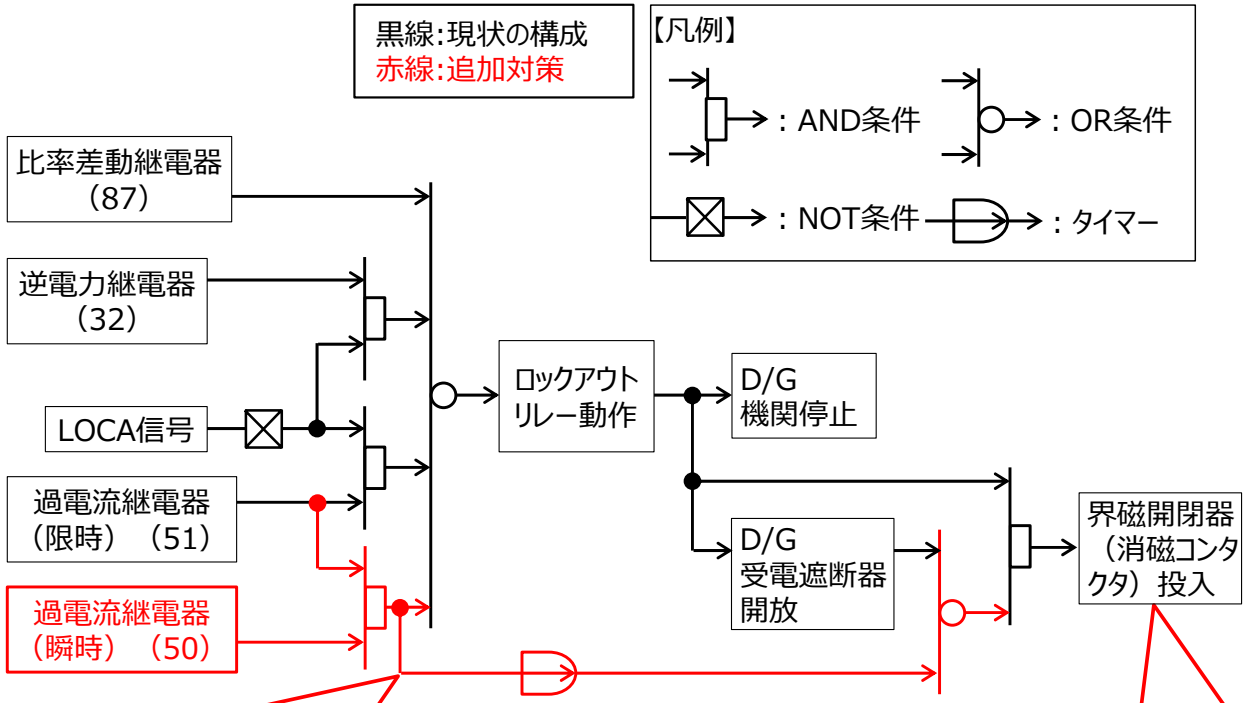
- 図6のD/G受電遮断器①でHEAFが発生した場合，上流にあるD/G④の停止により短絡電流を遮断する。
- D/G④の停止時間は，過電流継電器等の誤差を考慮したうえでM/C（D/G）のしきい値（16 MJ）を下回るように設定する。
- 遮断器②及び遮断器③でHEAFが発生した場合，上流のD/G受電遮断器①により短絡電流を遮断する。
- その他の遮断器に関しても，上流の遮断器により短絡電流を適切な遮断時間にて遮断することにより，アーク火災発生防止のしきい値を下回るように設計する。
- また，現状のD/G停止のインターロックは，LOCA発生時は事故対応を優先するため，D/Gは停止せずD/G受電遮断器も「閉」のままとなる。このため，HEAF対策として新たに過電流継電器（瞬時）（50）及びタイマーのインターロックを追加し，D/G受電遮断器の開放又はD/Gを停止して短絡電流を遮断する設計とする。（図７，図８参照）
- なお，遮断器による短絡電流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。



「×」はアーク放電箇所を示し，塗りつぶした遮断器は下流にある同色のアーク放電箇所に流れ込む短絡電流を遮断するために開放する設備を示す。

図6 東海第二発電所 非常用電源D系統の例（D/Gからの給電時）

➢ D/Gからの給電時のHEAF対策として，LOCA発生の有無にかかわらずD/G受電遮断器の開放又はD/Gを停止して短絡電流を遮断するために「過電流継電器（瞬時）（50）」及びタイマーのインターロックを追加する。



現状は，LOCA発生時に過電流継電器（限時）（51）が動作してもロックアウトリレーが動作しないため，補機側の遮断器でHEAF発生時は，新たに追加する過電流継電器（瞬時）（50）と既設の過電流継電器（限時）（51）とのAND条件にてD/G受電遮断器を開放し，短絡電流を遮断する。また，D/G受電遮断器でHEAF発生時は，当該遮断器が開放できないことを想定し，上記AND条件と新たに追加するタイマー動作で，界磁開閉器（消磁コンタクタ）を投入することでD/Gを停止し短絡電流を遮断する。

界磁開閉器（消磁コンタクタ）を投入することでD/Gの励磁を切り，短絡電流を早急に減衰させる。

図7　D/G停止インターロック概要

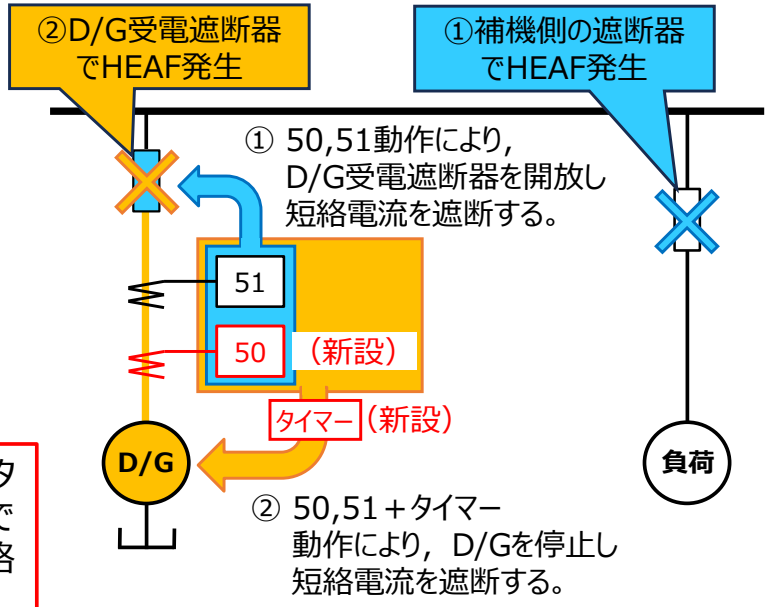


図8　D/Gからの給電時のHEAF対策イメージ

2.9 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

➢ 表8及び表9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8 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（1／7）（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 [s]	アークエネルギー [MJ]	しきい値 [MJ]
電気盤		遮断器名称				
メタルクラッド開閉装置（非常用）	M/C 2C	M/C 2C CB-606A (M/C 2A-2母線連絡遮断器)	M/C 2A-2 CB-602C (所内変圧器2Aより受電)	0.31	14	25
			M/C 2A-2 CB-602C (起動変圧器2Aより受電)	0.36	14	
		M/C 2C CB-606E (M/C 2E母線連絡遮断器)	M/C 2E CB-605C	0.48	15	
		M/C 2C母線に接続される遮断器 (M/C 2C CB-606A，CB-606Eを除く)	M/C 2C CB-606A (所内変圧器2Aより受電)	0.26	12	
			M/C 2C CB-606A (起動変圧器2Aより受電)	0.28	11	
			M/C 2C CB-606E	0.48	15	
	M/C 2D	M/C 2D CB-607B (M/C 2B-2母線連絡遮断器)	M/C 2B-2 CB-604D (所内変圧器2Bより受電)	0.31	14	
			M/C 2B-2 CB-604D (起動変圧器2Bより受電)	0.36	14	
		M/C 2D CB-607E (M/C 2E母線連絡遮断器)	M/C 2E CB-605D	0.48	15	
		M/C 2D母線に接続される遮断器 (M/C 2D CB-607B，CB-607Eを除く)	M/C 2D CB-607B (所内変圧器2Bより受電)	0.26	12	
			M/C 2D CB-607B (起動変圧器2Bより受電)	0.28	11	
			M/C 2D CB-607E	0.48	15	

表8　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（2／7）（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 [s]	アークエネルギー [MJ]	しきい値 [MJ]
電気盤		遮断器名称				
メタルクラッド開閉装置 HPCS	M/C HPCS	M/C HPCS　CB-608A（M/C 2A-1母線連絡遮断器）	M/C 2A-1　CB-601H（所内変圧器2Aより受電）	0.31	14	25
			M/C 2A-1　CB-601H（起動変圧器2Aより受電）	0.36	14	
		M/C HPCS　CB-608E（M/C 2E母線連絡遮断器）	M/C 2E　CB-605H	0.48	15	
		M/C HPCS母線に接続される遮断器（M/C HPCS　CB-608A，CB-608Eを除く）	M/C HPCS　CB-608A（所内変圧器2Aより受電）	0.26	12	
			M/C HPCS　CB-608A（起動変圧器2Aより受電）	0.28	11	
			M/C HPCS　CB-608E	0.48	15	
メタルクラッド開閉装置（常用）	M/C 2E	M/C 2E　CB-651（M/C 2E受電遮断器（予備変圧器二次側））	154kV開閉所GIS　CB O-71（予備変圧器遮断器）	0.73	23	
		M/C 2E CB-605H（M/C HPCS母線連絡遮断器）	M/C 2E　CB-651	0.73	23	
		M/C 2E　CB-605C（M/C 2C母線連絡遮断器）	M/C 2E　CB-651	0.73	23	
		M/C 2E　CB-605D（M/C 2D母線連絡遮断器）	M/C 2E　CB-651	0.73	23	
		M/C 2E　CB-605B（M/C 2B-1母線連絡遮断器）	M/C 2E　CB-651	0.73	23	
		M/C 2E母線に接続される遮断器（M/C 2E　CB-651，CB-605H，CB-605C，CB-605D，CB-605Bを除く）	M/C 2E　CB-651	0.73	23	

表8　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（3／7）（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[s]	アークエネルギー[MJ]	しきい値[MJ]
電気盤		遮断器名称				
パワーセンタ（非常用）	P/C 2C	P/C 2C　CB-465 （P/C 2C受電遮断器（動力変圧器二次側））	M/C 2C　CB-665	1.0	15	18
		P/C 2C　CB-404D （P/C 2D母線連絡遮断器）	P/C 2D　CB-404C	0.26	3.8	
		P/C 2C母線に接続される遮断器 （P/C 2C　CB-465，CB-404Dを除く）	P/C 2C　CB-465 （M/C 2Cより受電）	0.35	5.1	
			P/C 2C　CB-404D （P/C 2Dより受電）	0.26	3.8	
	P/C 2D	P/C 2D　CB-475 （P/C 2D受電遮断器（動力変圧器二次側））	M/C 2D　CB-675	1.0	15	
		P/C 2D　CB-404C （P/C 2C母線連絡遮断器）	P/C 2C　CB-404D	0.26	3.8	
		P/C 2D母線に接続される遮断器 （P/C 2D　CB-475，CB-404Cを除く）	P/C 2D　CB-475 （M/C 2Dより受電）	0.35	5.1	
			P/C 2D　CB-404C （P/C 2Cより受電）	0.26	3.8	

表8　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（4／7）（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 [s]	アークエネルギー [MJ]	しきい値 [MJ]
電気盤		遮断器名称				
パワーセンタ（常用）	P/C 2A-1	P/C 2A-1　CB-415 （P/C 2A-1受電遮断器（動力変圧器二次側））	M/C 2A-1　CB-615	0.93	14	18
		P/C 2A-1　CB-401B （P/C 2B-1母線連絡遮断器）	P/C 2B-1　CB-401A	0.27	3.9	
		P/C 2A-1母線に接続される遮断器 （P/C 2A-1　CB-415，CB-401Bを除く）	P/C 2A-1　CB-415 （M/C 2A-1より受電）	0.32	4.6	
			P/C 2A-1　CB-401B （P/C 2B-1より受電）	0.27	3.9	
	P/C 2A-2	P/C 2A-2　CB-425 （P/C 2A-2受電遮断器（動力変圧器二次側））	M/C 2A-2　CB-625	0.93	14	
		P/C 2A-2　CB-402B （P/C 2B-2母線連絡遮断器）	P/C 2B-2　CB-402A	0.27	3.9	
		P/C 2A-2母線に接続される遮断器 （P/C 2A-2　CB-425，CB-402Bを除く）	P/C 2A-2　CB-425 （M/C 2A-2より受電）	0.32	4.6	
			P/C 2A-2　CB-402B （P/C 2B-2より受電）	0.27	3.9	

表8　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（5／7）（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[s]	アークエネルギー[MJ]	しきい値[MJ]
電気盤		遮断器名称				
パワーセンタ（常用）	P/C 2B-1	P/C 2B-1　CB-435 （P/C 2B-1受電遮断器（動力変圧器二次側））	M/C 2B-1　CB-635	0.93	14	18
		P/C 2B-1　CB-401A （P/C 2A-1母線連絡遮断器）	P/C 2A-1　CB-401B	0.27	3.9	
		P/C 2B-1母線に接続される遮断器 （P/C 2B-1　CB-435，CB-401Aを除く）	P/C 2B-1　CB-435 （M/C 2B-1より受電）	0.32	4.6	
			P/C 2B-1　CB-401A （P/C 2A-1より受電）	0.27	3.9	
	P/C 2B-2	P/C 2B-2　CB-445 （P/C 2B-2受電遮断器（動力変圧器二次側））	M/C 2B-2　CB-645	0.93	14	
		P/C 2B-2　CB-402A （P/C 2A-2母線連絡遮断器）	P/C 2A-2　CB-402B	0.27	3.9	
		P/C 2B-2母線に接続される遮断器 （P/C 2B-2　CB-445，CB-402Aを除く）	P/C 2B-2　CB-445 （M/C 2B-2より受電）	0.32	4.6	
			P/C 2B-2　CB-402A （P/C 2A-2より受電）	0.27	3.9	

表8　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（6／7）（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[s]	アークエネルギー[MJ]	しきい値[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 2C系	MCC 2C-3母線に接続される遮断器	P/C 2C ユニットNo.6C	0.16	3.4	4.4
		MCC 2C-4母線に接続される遮断器	P/C 2C ユニットNo.7C	0.16	1.5	
		MCC 2C-5母線に接続される遮断器	P/C 2C ユニットNo.4B	0.16	3.4	
		MCC 2C-6母線に接続される遮断器	P/C 2C ユニットNo.5B	0.16	3.4	
		MCC 2C-7母線に接続される遮断器	P/C 2C ユニットNo.6B	0.16	1.5	
		MCC 2C-8母線に接続される遮断器	P/C 2C ユニットNo.7B	0.16	3.4	
		MCC 2C-9母線に接続される遮断器	P/C 2C ユニットNo.8C	0.16	3.4	

表8　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（7／7）（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[s]	アークエネルギー[MJ]	しきい値[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 2D系	MCC 2D-3母線に接続される遮断器	P/C 2D　ユニットNo.6C	0.16	3.4	4.4
		MCC 2D-4母線に接続される遮断器	P/C 2D　ユニットNo.7C	0.16	1.5	
		MCC 2D-5母線に接続される遮断器	P/C 2D　ユニットNo.4B	0.16	3.4	
		MCC 2D-6母線に接続される遮断器	P/C 2D　ユニットNo.5B	0.16	3.4	
		MCC 2D-7母線に接続される遮断器	P/C 2D　ユニットNo.6B	0.16	1.5	
		MCC 2D-8母線に接続される遮断器	P/C 2D　ユニットNo.7B	0.16	3.4	
		MCC 2D-9母線に接続される遮断器	P/C 2D　ユニットNo.8C	0.16	3.4	
モータコントロールセンタ HPCS	MCC HPCS	MCC HPCS母線に接続される遮断器	M/C HPCS　CB-685	0.14	0.89	

表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（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 [s]	アークエネルギー [MJ]	しきい値 [MJ]
電気盤		遮断器名称				
メタルクラッド開閉装置（非常用）	M/C 2C	M/C 2C　CB-660 (2C非常用ディーゼル発電機受電遮断器)	—＊1	8.36	14.0	16
		M/C 2C母線に接続される遮断器 (M/C 2C　CB-660を除く)	M/C 2C　CB-660	2.876	9.0	
	M/C 2D	M/C 2D　CB-670 (2D非常用ディーゼル発電機受電遮断器)	—＊2	10.02	13.7	
		M/C 2D母線に接続される遮断器 (M/C 2D　CB-670を除く)	M/C 2D　CB-670	2.676	7.9	
メタルクラッド開閉装置HPCS	M/C HPCS	M/C HPCS　CB-680 （高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機受電遮断器）	—＊3	7.32	13.6	
		M/C HPCS母線に接続される遮断器 （M/C HPCS　CB-680を除く）	M/C HPCS　CB-680	1.276	5.9	

注記＊1：メタルクラッド開閉装置（非常用）におけるアーク放電を遮断するため，2C非常用ディーゼル発電機を停止する。
＊2：メタルクラッド開閉装置（非常用）におけるアーク放電を遮断するため，2D非常用ディーゼル発電機を停止する。
＊3：メタルクラッド開閉装置HPCSにおけるアーク放電を遮断するため，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を停止する。

➢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定した。

・以上により，HEAF対策を適切に実施する。

➢ 申請概要
今回の設工認申請において，申請する書類を表10に示す。

表10 今回の設計及び工事計画認可申請書類一覧

No.	項目	記載内容
1	非常用電源設備の基本設計方針，適用基準及び適用規格	HEAF対策が必要な電気盤について，「遮断器の遮断時間の適切な設定及びD/G機関の停止等により，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ことができる」旨の記載を追加している。 今回の設工認申請における適合性を説明するために必要な適用基準等を記載している。
2	発電用原子炉の設置の許可との整合性に関する説明書	今回の設工認申請で追加した工事計画（基本設計方針）と発電用原子炉設置許可申請書との整合性を示している。
3	安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書	アーク火災の発生を防止するための保護継電器を追加することによる影響を踏まえ，既設のD/Gに対して「多重性，多様性及び位置的分散」，「悪影響防止」，「環境条件等」，「操作性及び試験・検査性」の設計上の考慮について示している。
4	発電用原子炉施設の火災防護に関する説明書	火災感知設備及び消火設備について，審査ガイドを踏まえ，HEAFが発生した場合を考慮して配置されていることを確認した結果，現在の配置が適切であり，これまでの設計を変更するものではないことを示している。
5	非常用発電装置の出力の決定に関する説明書	HEAF対策の内容（アーク火災の発生を防止するための遮断器の遮断時間の設定等）について示している。
6	設計及び工事に係る品質マネジメントシステムに関する説明書	設計に係る品質管理の方法より行った管理の実績，管理の計画，工事及び検査に係る品質管理の方法，組織等についての具体的な計画を示している。
7	単線結線図	アーク火災の発生を防止するため保護継電器を追加することから，追加する保護継電器を単線結線図に示している。

表11　高エネルギーアーク損傷対策に係る設計及び工事計画　全体工程

	2024年度			2025年度											2026年度								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
設計及び工事計画手続き		▼申請																						
		審査																						
工事・検査時期																								
								工事期間																
										検査時期※														

※検査時期は，工事の進捗により変更の可能性あり

参考資料

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1表1及び参考1表2に示す。

参考1表1　技術基準規則の解釈（抜粋）（下線は改正部分）

改正後	改正前	対応方針
第45条（保安電源設備） 1～3【略】 4 第3項第1号に規定する「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」とは、重要安全施設(設置許可基準規則第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、遮断器の遮断時間の適切な設定等により、高エネルギーのアーク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いう。 6～10【略】	第45条（保安電源設備） （新設） 4～8【略】	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になるようにアーク放電の遮断時間を設計する。

参考1表2　審査ガイド（抜粋）

審査ガイド（抜粋）	対応方針
1.総則 1.1 目的 【略】 本ガイドでは、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。	新たに制定された審査ガイドを踏まえ，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定する。

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）

- 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。 技術基準規則のうち経過措置に係る記載を参考1表3に示す。

参考1表3　技術基準規則のうち経過措置に係る記載（抜粋）

技術基準規則（抜粋）	対応方針
附　則（平成二九年八月八日原子力規制委員会規則第一二号） （経過措置） 第二条 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（法第四十三条の三の五第二項第五号に規定する発電用原子炉施設をいう。以下同じ。）に対する第一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。）第四十五条第三項（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。）及び第一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。）第四十四条第三項（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、平成三十一年八月一日以後最初に当該発電用原子炉施設に係る法第四十三条の三の十六第一項の検査を終了した日又は平成三十一年八月一日以後に発電用原子炉（法第二条第五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。【略】 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（法第四十三条の三の五第二項第五号に規定する発電用原子炉施設をいう。以下同じ。）に対する第一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。）第四十五条第三項（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。）及び第一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。）第四十四条第三項（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、平成三十一年八月一日以後最初に当該発電用原子炉施設に係る法第四十三条の三の十六第一項の検査を終了した日又は平成三十一年八月一日以後に発電用原子炉（法第二条第五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。【略】	今回の設工認申請において，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。

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）

➢ 重要安全施設は，参考1表4に示すとおり，「実用発電用原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（以下「設置許可基準規則」）という。）」の解釈にて定義されている。

参考1表4　設置許可基準規則及びその解釈（抜粋）

設置許可基準規則	設置許可基準規則の解釈
(定義) 第二条 九 「重要安全施設」とは、安全施設のうち、安全機能の重要度が特に高い安全機能を有するものをいう。 (安全施設) 第十二条 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。	第12条(安全施設) 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 。 ・原子炉の緊急停止機能 ・未臨界維持機能 ・原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能 ・原子炉停止後の除熱機能 ・炉心冷却機能 ・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造物)を除く。) ・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 ・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。)

参考2.1　電気盤の選定

- 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，実機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り，電気盤の開口部や盤内仕切板の変形により高温ガスは電気盤外に抜けることから，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。

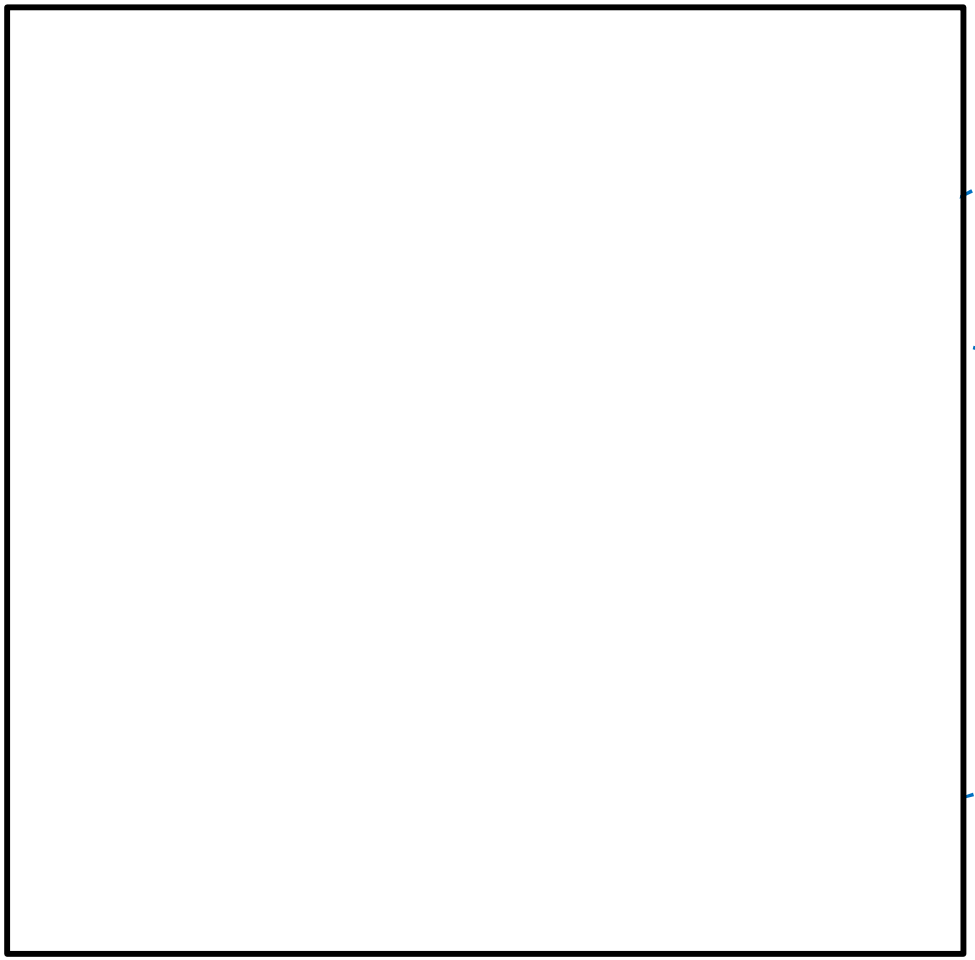
④アークエネルギー…審査ガイドを踏まえ，アーク放電の継続時間を段階的に変化させてHEAF試験を実施しており，このパラメータは同等性を有する電気盤に対する試験条件であることから，電気盤選定の同等性に影響を与えるおそれはない。

参考2図1　HEAF試験状況
(M/C試験時)

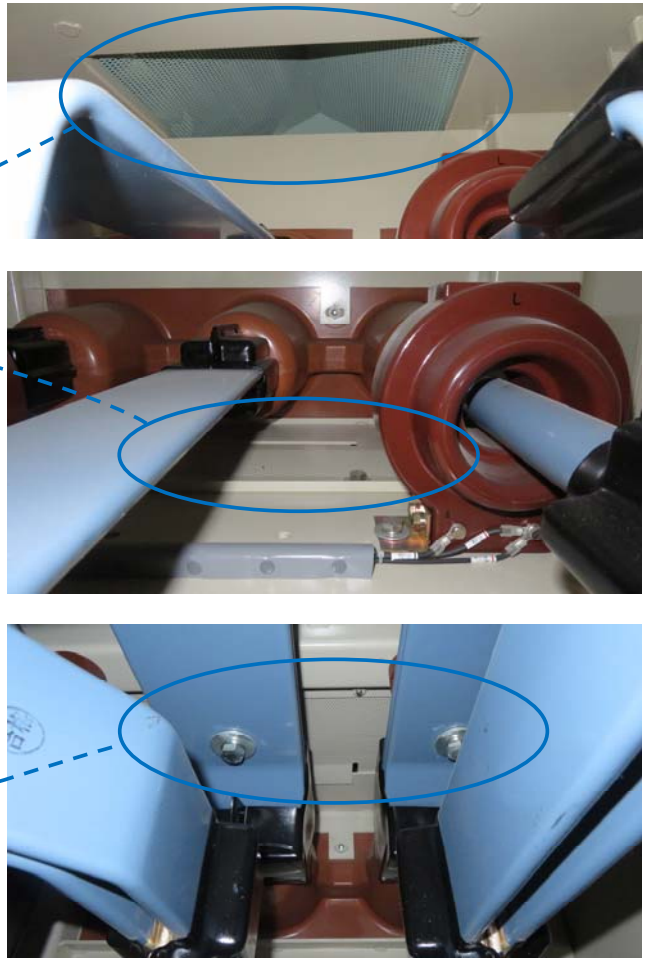
参考2.1　電気盤の選定

①非密閉性の程度に対する同等性

- 電気盤は参考2図2のとおり，密閉構造ではなく開口部を有する構造であり，電気盤の開口部や盤内仕切板の変形により高温ガスは電気盤外に抜けることから，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造図



盤内部の写真

参考2図2　実機の電気盤の開口部（M/Cの例）

②高温ガスの滞留場所に対する同等性について

- 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（JEM）及び電気規格調査会標準規格（JEC）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は，実機と試験体は同等性を有している。

参考2表1　実機と試験体の電気盤との比較（M/Cの例）

	実機	試験体
規格類	盤：JEM-1425 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 （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」）	7.2 kV	
外形寸法		

③可燃物に対する同等性について

- 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。このため，可燃物については，実機と試験体は同等性を有している。

参考2表2　実機と試験体の電気盤との比較（M/C（D/G）の例）

	実機	**試験体**
絶縁物の材料	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	不飽和ポリエステル樹脂（耐熱温度：130 ℃～150 ℃） ・絶縁フレーム
外形図		

参考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，実機の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2表3及び参考2表4のとおり設定している。

参考2表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】東海第二発電所のHEAF対策対象の電気盤の短絡電流値
M/C	18.9 kA又は 40.0 kA*1	25.4 kA，31.2 kA，36.1 kA*2
P/C	45.0 kA	34.3 kA*3
MCC	45.0 kA	10.5 kA，15.0 kA，34.3 kA*4
M/C （D/G）	5.0 kA	2.38 kA（D/G 2C）， 2.33 kA（D/G 2D）， 3.69 kA（D/G HPCS）*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 2C，2D及びHPCSで発生する短絡電流値を記載
（予備変圧器からの給電時：25.4 kA，
起動変圧器からの給電時：31.2 kA，
所内変圧器からの給電時：36.1 kA）
＊3：P/C 2C及び2Dで発生する短絡電流値を記載
＊4：MCC 2C系，2D系及びHPCSで発生する短絡電流値を記載
（MCC HPCSへの給電時：10.5 kA，
MCC 2C-4,7，2D-4,7への給電時：15.0 kA，
MCC 2C-3,5,6,8,9，2D-3,5,6,8,9への給電時：34.3 kA）
＊5：「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）」での試験条件設定の考え方詳細に示すとおり，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。

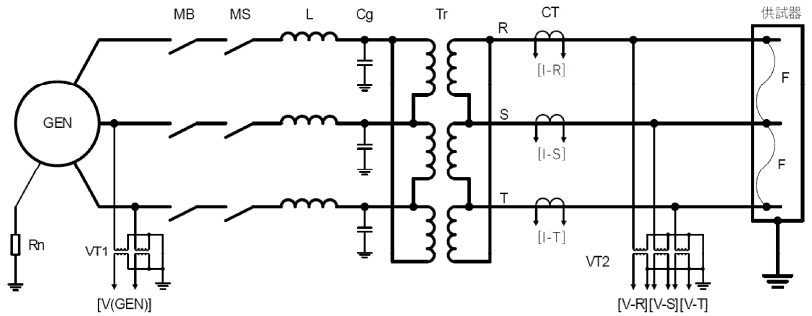
参考2表4　HEAF試験時における試験初期の印加電圧

電気盤	試験初期の印加電圧	【参考】東海第二発電所のHEAF対策対象の電気盤の定格使用電圧
M/C	6.9 kV又は 8.0 kV *1	6.9 kV*2
P/C	504 V	480 V*3
MCC	504 V	480 V*4
M/C （D/G）	6.9 kV	6.9 kV*5

注記
＊1：試験設備の都合により，短絡電流目標値18.9 kAに対しては6.9 kVで実施し，40.0 kAに対しては8.0 kVで実施した。
＊2：M/C 2C，2D及びHPCSの定格使用電圧を記載
＊3：P/C 2C及び2Dの定格使用電圧を記載
＊4：MCC 2C系，2D系及びHPCS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

参考2.3　HEAF試験に用いる電気回路

- HEAF試験における電気回路は，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で構成されている。



・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。

GEN	短絡発電機	Tr	変圧器（15 kV / 12 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（4kA/1A, max63kA）
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		

参考2図3　M/C試験回路

参考2.4　測定項目

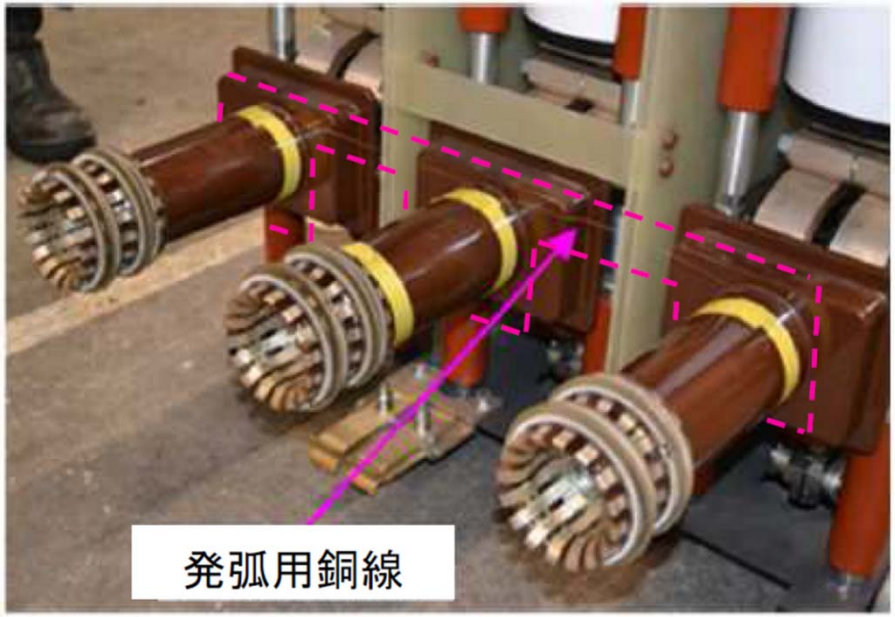
- HEAF試験においては，変流器又は分流器により電流波形を測定し，計器用変圧器（VT2）により電圧波形を測定している。
- 審査ガイドの「（参考－１）その他の測定項目」に記載されている電気盤周囲の熱流束及び電気盤内圧力の測定並びに高速度カメラによる動画撮影等を実施している。

参考2表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，高速度カメラによる動画撮影，電気盤周囲の熱流束
MCC	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，電気盤周囲の熱流束
M/C（D/G）	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，電気盤周囲の熱流束

参考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2図4　遮断器の短絡箇所（M/C試験時）

参考2図5　遮断器の短絡箇所（MCC試験時）

参考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，実機の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2表6　HEAF試験条件及び試験結果（M/C）

種類	電気盤	試験初期の印加電圧 [kV]	試験初期の印加電流 [kA]	アーク放電の継続時間 [s]		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（東海第二発電所の最大値） [MJ]
				設定値	実測値			
M/C	試験体①	6.9	18.9	0.1	0.103	3.09	無	25
				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②	8.0	40.0	0.2	0.22	12.8		
				0.2	0.21	8.68		
				0.6	0.63	25.3		

参考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2表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 1) (V)	相別	試験電流 最大波高値 (kA)	試験電流 初期3半端実効値 (kA)	試験電流 最終実効値 (kA)	試験電流 AC成分の時間積分値 (kA·s)	試験電流 投入位相 2) (deg)	通電時間 (s)	最大アークパワー (MW)	全アークエネルギ (MJ)	内部圧力 測定箇所	内部圧力 最大値 (kPa)	内部圧力 到達時間 3) (ms)	破損状況
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%

参考2表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 1) (V)	相別	試験電流 最大波高値 (kA)	試験電流 初期3半端実効値 (kA)	試験電流 最終実効値 (kA)	試験電流 AC成分の時間積分値 (kA·s)	試験電流 投入位相 2) (deg)	通電時間 (s)	最大アークパワー (MW)	全アークエネルギ (MJ)	内部圧力 測定箇所	内部圧力 最大値 (kPa)	内部圧力 到達時間 3) (ms)	備　考
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							

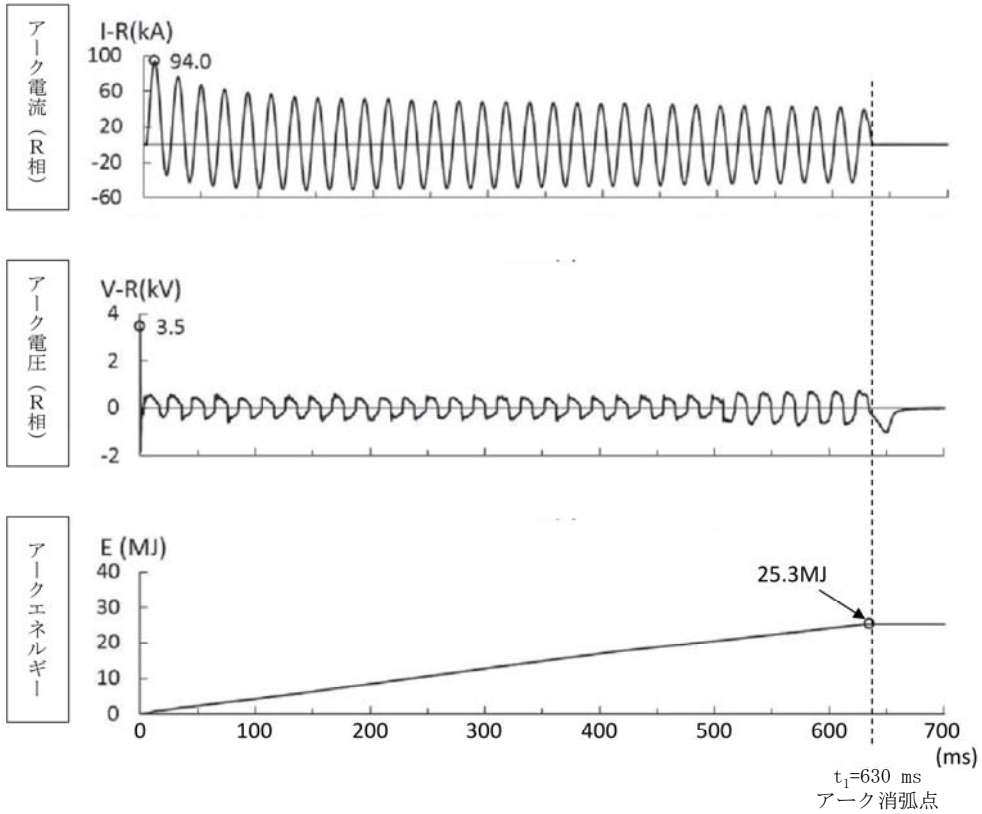
備　考
1) 発電機電圧より換算した値（参考値）
2) 発電機電圧（S-T 相）を基準とした位相角
3) 内部圧力上昇値が、第一相の通電開始から最大値に達するまでの時間（500 Hz のローパスフィルターを適用）
4) 試験番号 10-1 で使用した盤 Z を清掃し，相間および対地間の絶縁性能を回復させた。なお，5 段目の MCCB ユニットと母線を接続する部品については，確実に絶縁回復させるために取り外した。

参考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。アークエネルギーの算出過程について，M/Cを例に以下に示す。
- 参考2図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。

$$E_1 = \int_0^{t_1} W_1 \, dt$$
$$= \int_0^{t_1} (V_1 \cdot I_1) \, dt$$
$$= 25.3 \ [\mathrm{MJ}]$$

E_1：アークエネルギー
W_1：アークパワー
V_1：アーク電圧
I_1：アーク電流
t_1：アーク放電の継続時間（630 ms）



参考2図6　HEAF試験時の測定波形（M/C試験時）

参考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。

参考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。なお，本件に係る申請を行っている各電力会社は，電力中央研究所の試験で得られたデータを使用している。

参考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

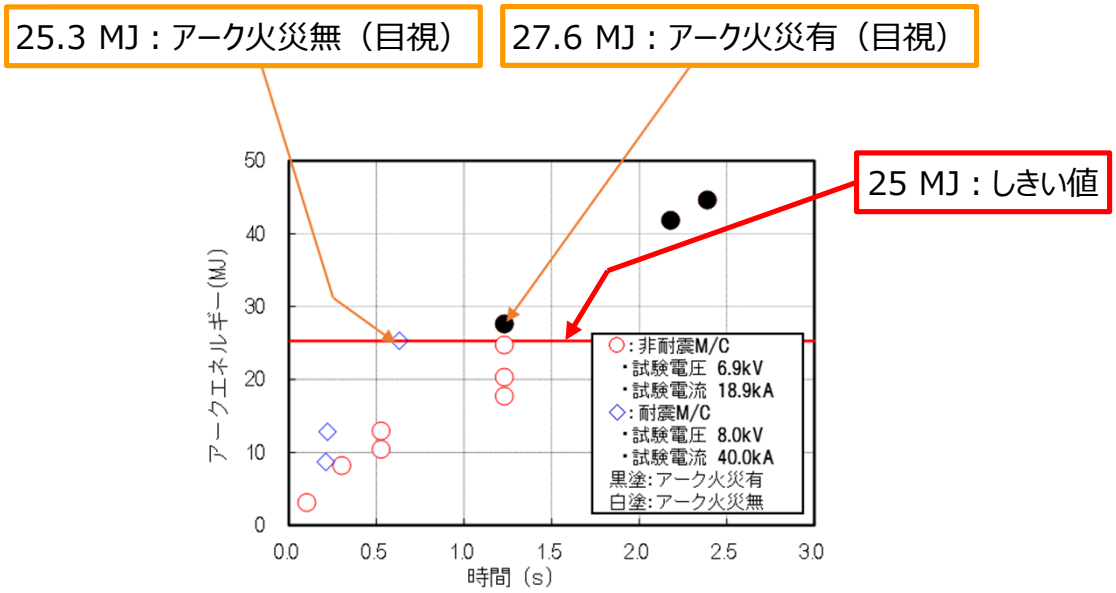
- 審査ガイドを踏まえ，しきい値がHEAF試験においてアーク火災が発生しなかった場合の最大のアークエネルギー値となっていること及びアーク火災が発生した全てのアークエネルギー値を下回っていることを確認する。

試験結果　M/C

- 25.3 MJ以下ではアーク火災が発生し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25 MJとする。

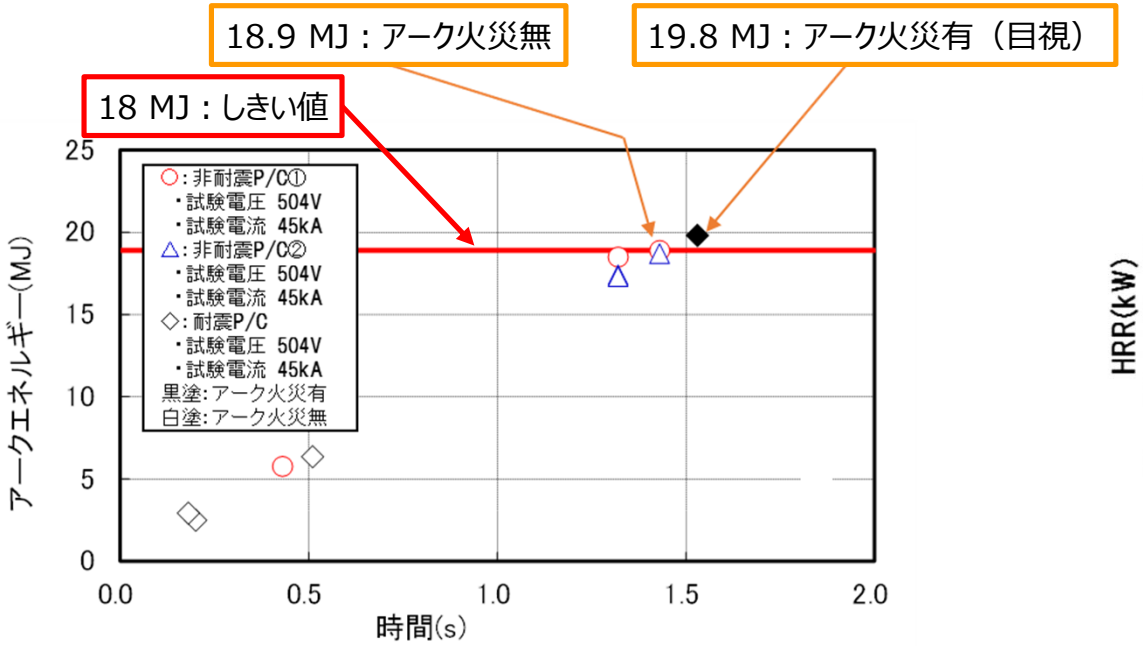
アーク火災有無の判定

- 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。

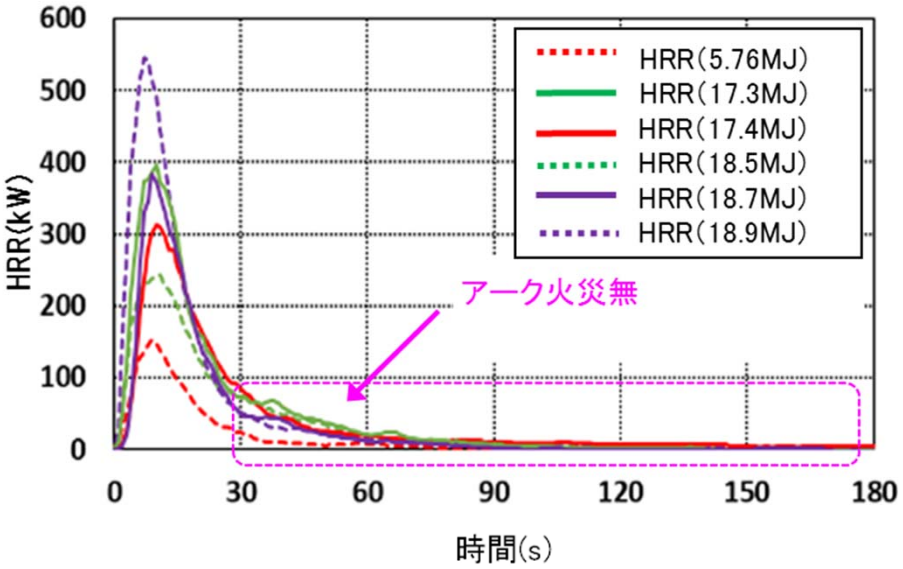


参考3図1　試験結果（アーク火災発生状況）

試験結果　P/C
- 18.9 MJ以下ではアーク火災が発生し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18 MJとする。

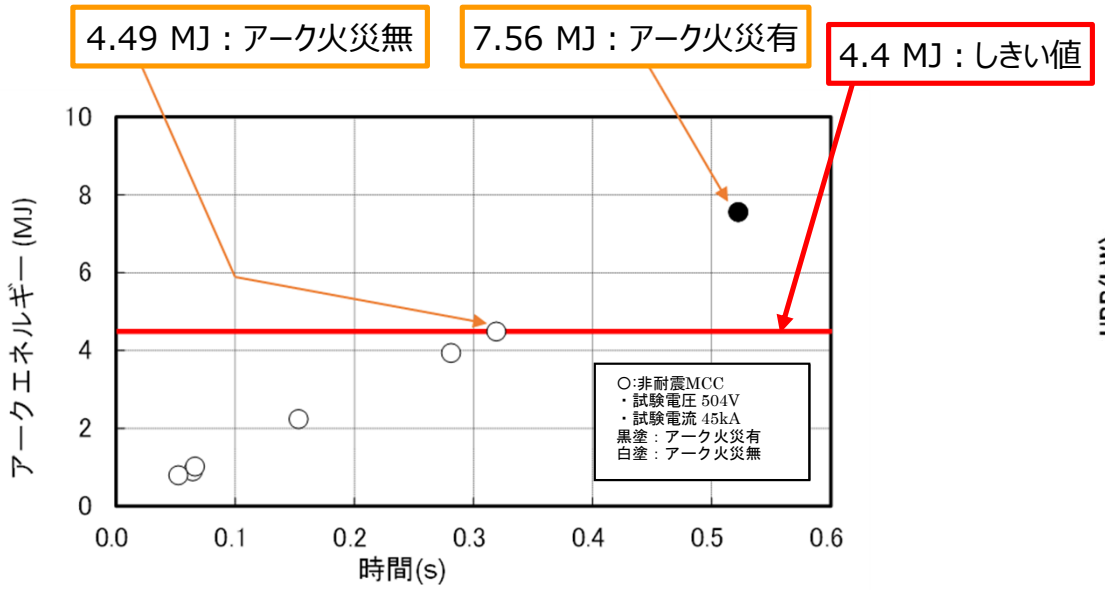


参考3図2　試験結果（アーク火災発生状況）

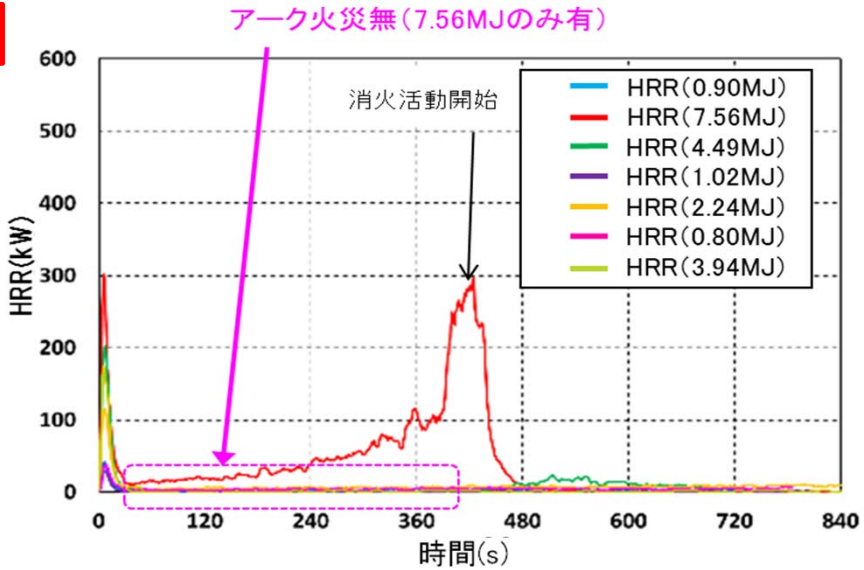


参考3図3　発熱速度（HRR）測定結果
（P/C試験時）

試験結果　MCC
- 4.49 MJ以下ではアーク火災が発生し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4.4 MJとする。

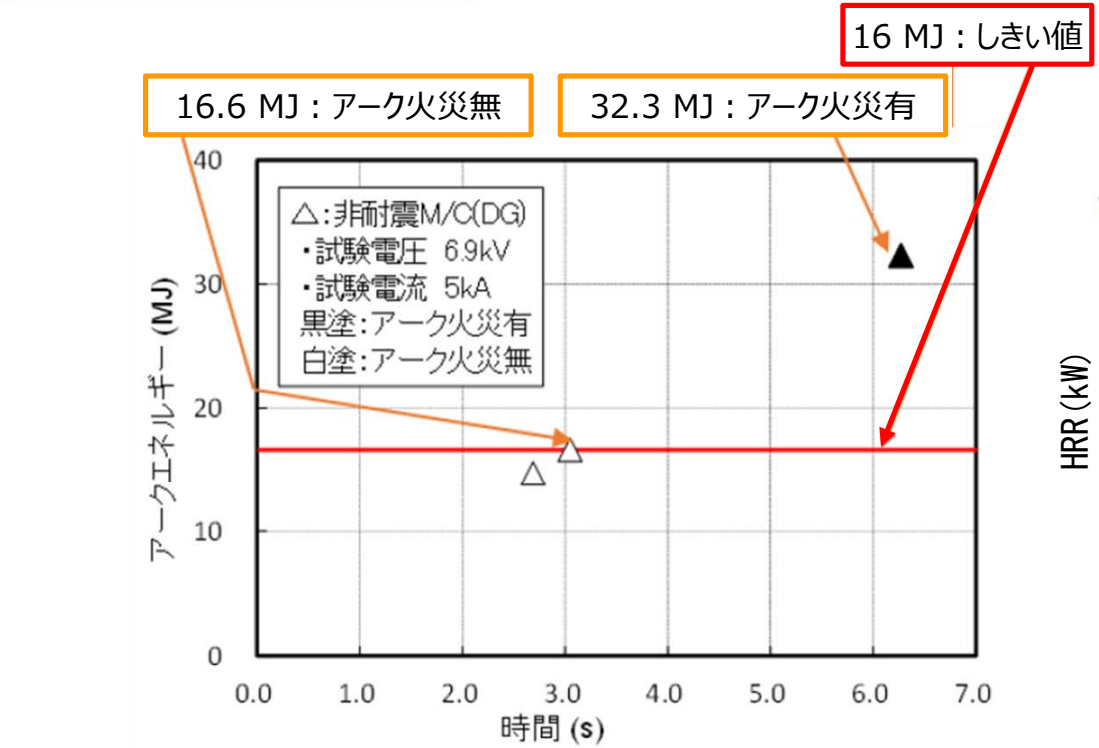


参考3図4　試験結果（アーク火災発生状況）

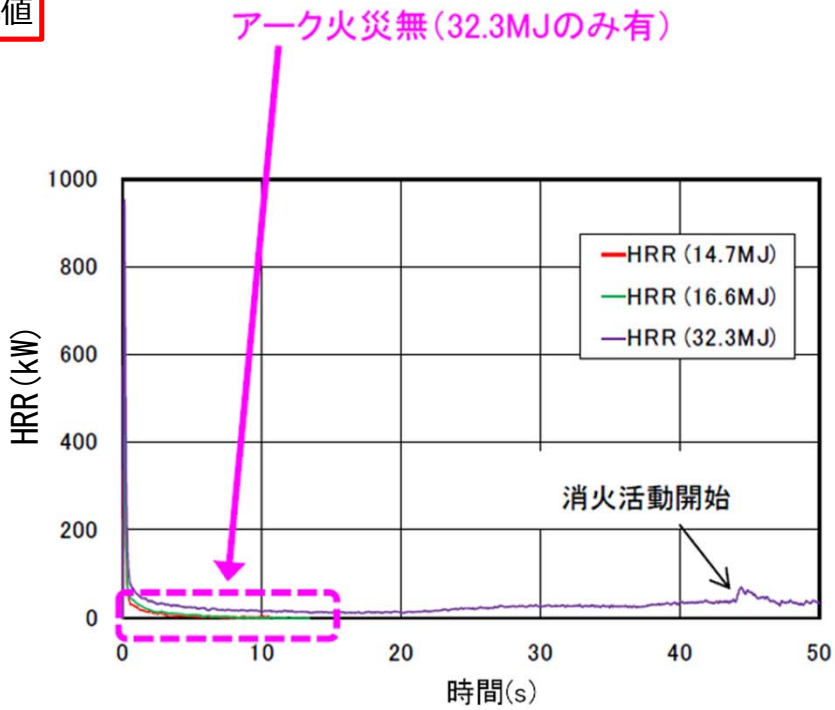


参考3図5　発熱速度（HRR）測定結果
（MCC試験時）

試験結果　M/C（D/G）
- 16.6 MJ以下ではアーク火災が発生し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16 MJとする。



参考3図6　試験結果（アーク火災発生状況）

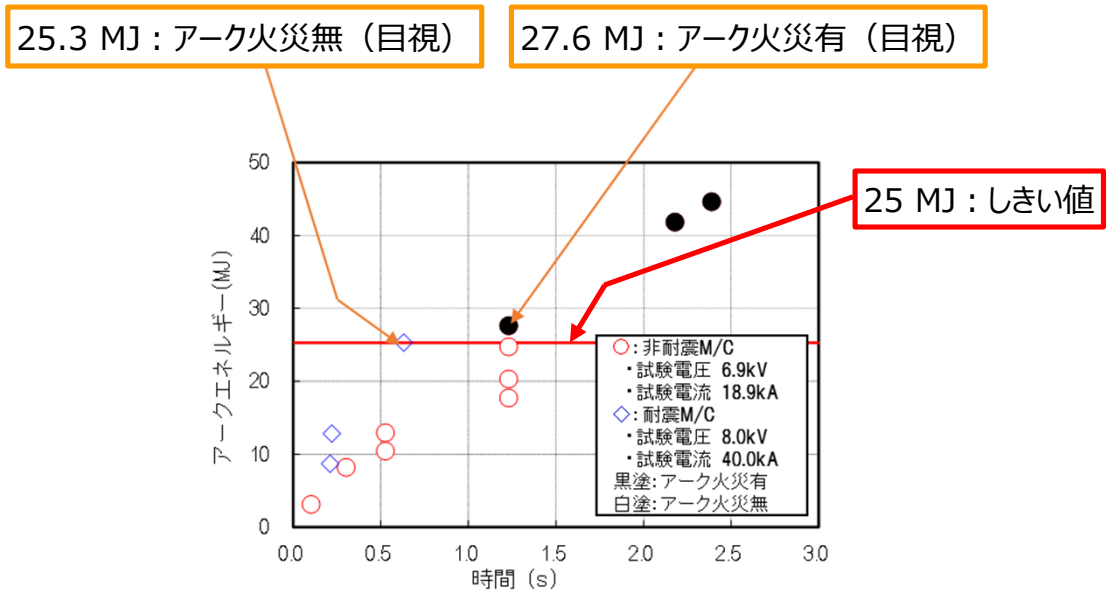


参考3図7　発熱速度（HRR）測定結果
（M/C（D/G）試験時）

➢ アーク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いる。

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ときの値の間に存在する」（審査ガイドより抜粋）ことから，アーク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。



参考3図8　しきい値設定の例示（M/C）

②アークエネルギーの測定誤差

参考3表1のとおり，最大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3表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

参考4.1　アーク放電の遮断時間の設定

- 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。

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

$E_{3\phi}$ ：三相のアークエネルギー（MJ）
V_{arc}：HEAF試験の結果から得られたアーク電圧（kV）
I_{arc} ：三相短絡電流の平均値（kA）
I_{rms}：三相短絡電流の実効値（kA）
t_{arc} ：アーク発生時の遮断器の遮断時間（s）

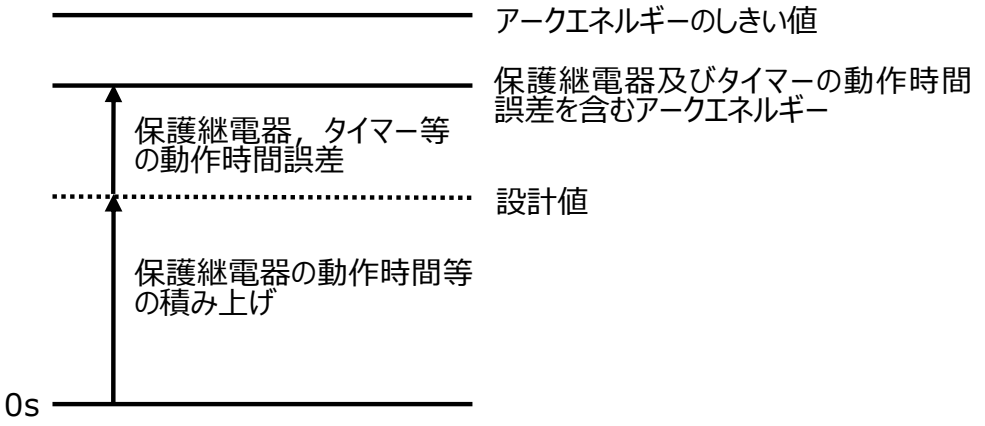
・HEAF試験の結果から得られたアーク電圧について
- アークエネルギーの算出時に使用するアーク電圧は，HEAF試験の結果のアーク電圧を用いた。

・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（発電機及び変圧器を含む。）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。

$$\text{短絡電流[A]} = \frac{\text{三相短絡容量[VA]}}{\sqrt{3} \times \text{基準電圧[V]}} \times \frac{100}{\%Z}$$

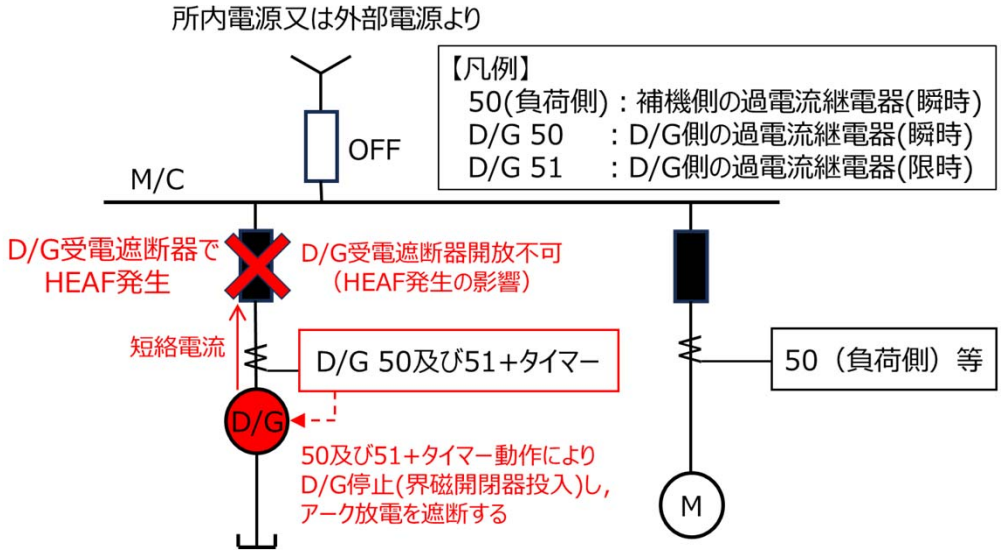
・アーク放電の遮断時間について

➢ 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4図1参照）。



参考4図1　アーク放電の遮断時間イメージ

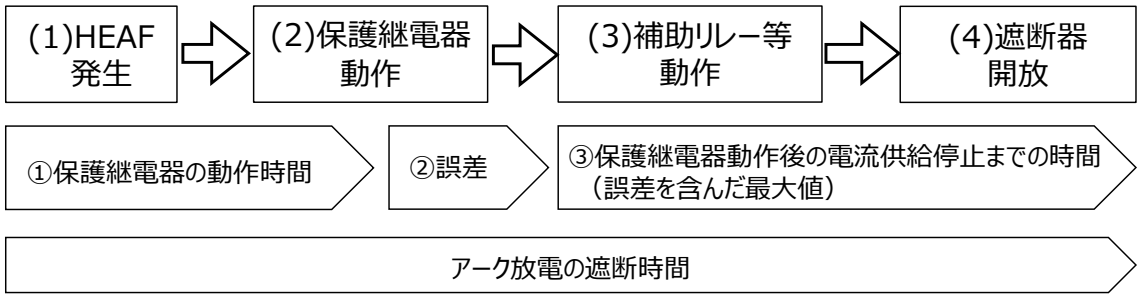
➢ M/C（D/G）については，D/Gから非常用母線へ給電中にD/G受電遮断器でHEAFが発生した場合，D/G受電遮断器とD/Gの間にアーク放電を遮断するための遮断器がないことから，D/Gの保護継電器によりD/Gを停止し，D/Gからの給電が停止するまでの期間に発生するアークエネルギーがアークエネルギーのしきい値以下となるよう設計している（参考4図2参照）。



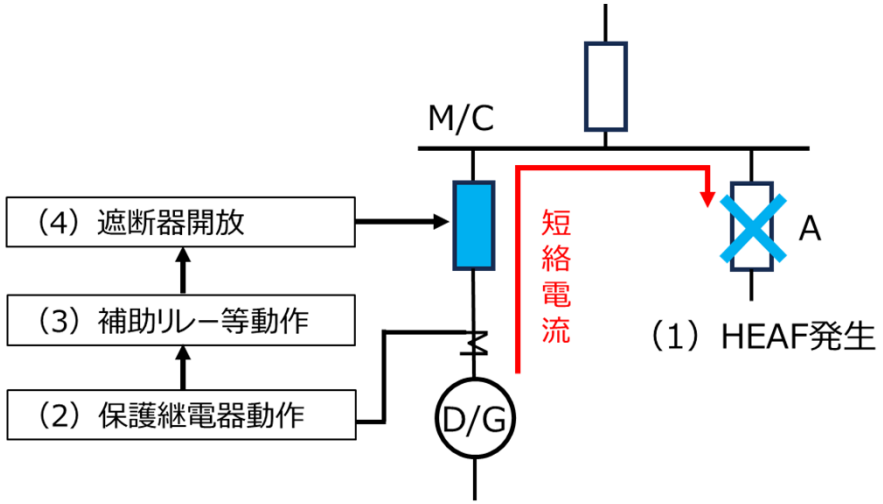
参考4図2　D/G受電遮断器でHEAFが発生した場合のイメージ

参考４　HEAFに係る対策の判断基準（3／4）

- 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4図3及び参考4図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4図3　HEAF発生から遮断器開放までの動作に含まれる誤差



参考4図4　HEAF発生から遮断器開放までの動作

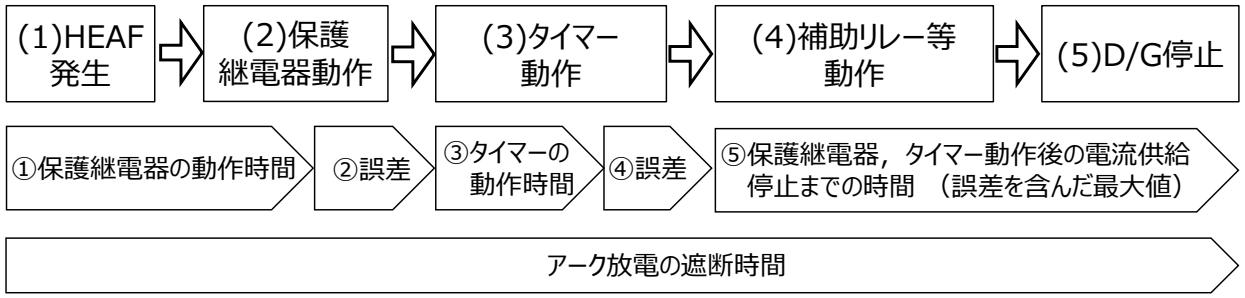
参考4表1　HEAF発生から遮断器開放までの時間とアークエネルギー

HEAF発生箇所		① 保護継電器の動作時間 [s]	② 誤差 [s]	③ 保護継電器動作後の電流供給停止までの時間 [s]	①+②+③ 電流の遮断時間 [s]	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

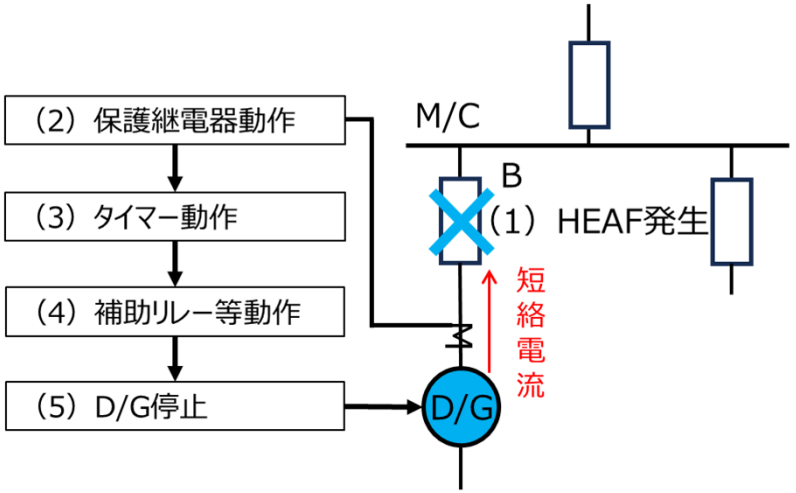
A ：M/C 2C母線に接続される遮断器（M/C 2C　CB-660を除く）

参考４　HEAFに係る対策の判断基準（4／4）

- 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4図5及び参考4図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4図5　HEAF発生からD/G停止までの動作に含まれる誤差



参考4図6　HEAF発生からD/G停止までの動作

参考4表2　HEAF発生からD/G停止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 [s]	②誤差 [s]	③タイマーの動作時間 [s]	④誤差 [s]	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 [s]	①+②+③+④+⑤電流の遮断時間 [s]	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 ：M/C 2C　CB-660（2C非常用ディーゼル発電機受電遮断器）

参考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】

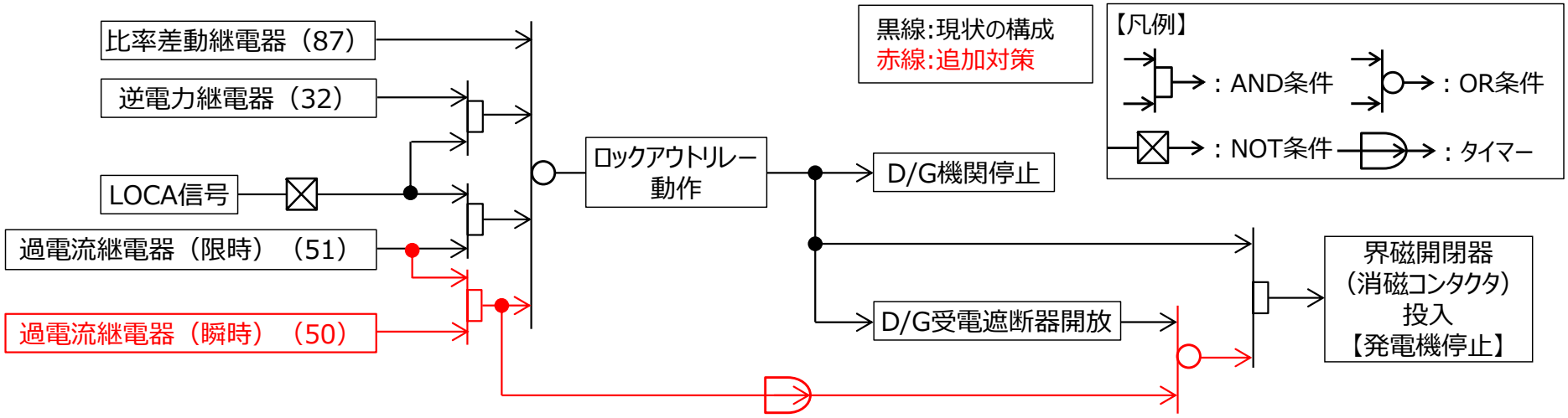
- LOCA 発生時は，D/G側の過電流継電器（限時）（51）（以下「D/G 51」という。）が動作した場合，LOCA発生時は事故対応を優先し，D/Gは停止せず，D/G受電遮断器も「閉」のままとなる。LOCA 発生時以外は，D/G 51が動作した場合は，D/Gが停止するとともに，D/G受電遮断器が「開」となる（参考5図1参照）。

【既設インターロックでHEAFが発生した場合の動作】

- LOCA発生時は，補機の遮断器又はD/G受電遮断器でHEAFが発生した場合，D/Gは停止せず，D/G受電遮断器も「閉」のままとなることから，D/Gからの給電が継続され，アーク火災が発生するおそれがある。
- LOCA発生時以外は，補機の遮断器でHEAFが発生した場合は，D/Gが停止するとともに，D/G受電遮断器が「開」となるが，D/G受電遮断器でHEAFが発生した場合は，D/G 51の動作によりD/G機関は停止するが，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，界磁開閉器（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おそれがある。

【HEAF対策】

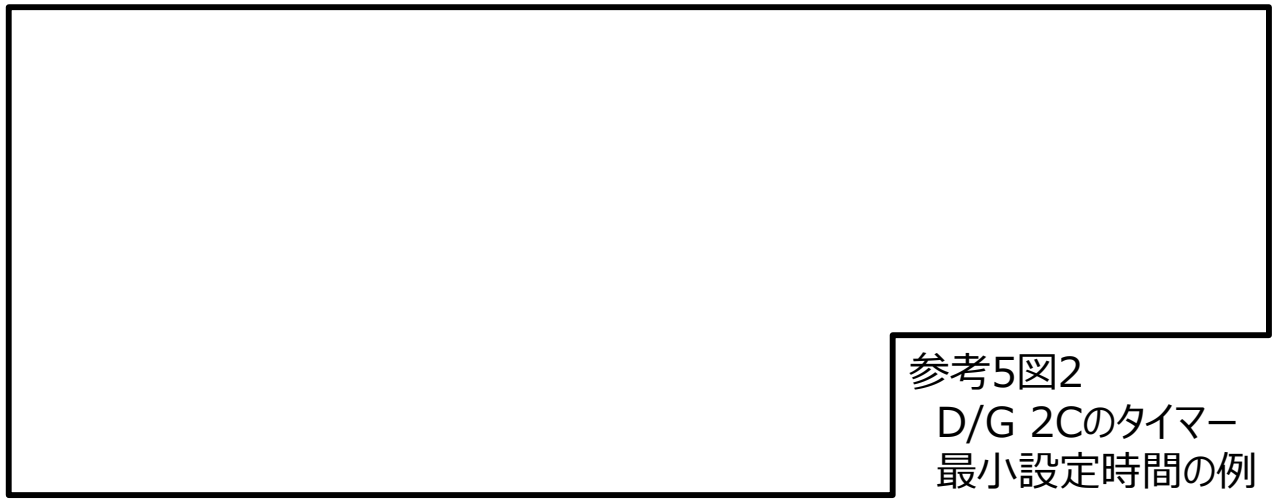
- アーク火災に至る前にD/G受電遮断器を開放又はD/Gからの給電を停止するため，D/G側に過電流継電器（瞬時）（50）（以下「D/G 50」という。）とタイマーを追加し，ロックアウトリレー動作又は界磁開閉器（消磁コンタクタ）投入となるインターロックを追加する（参考5図1参照）。



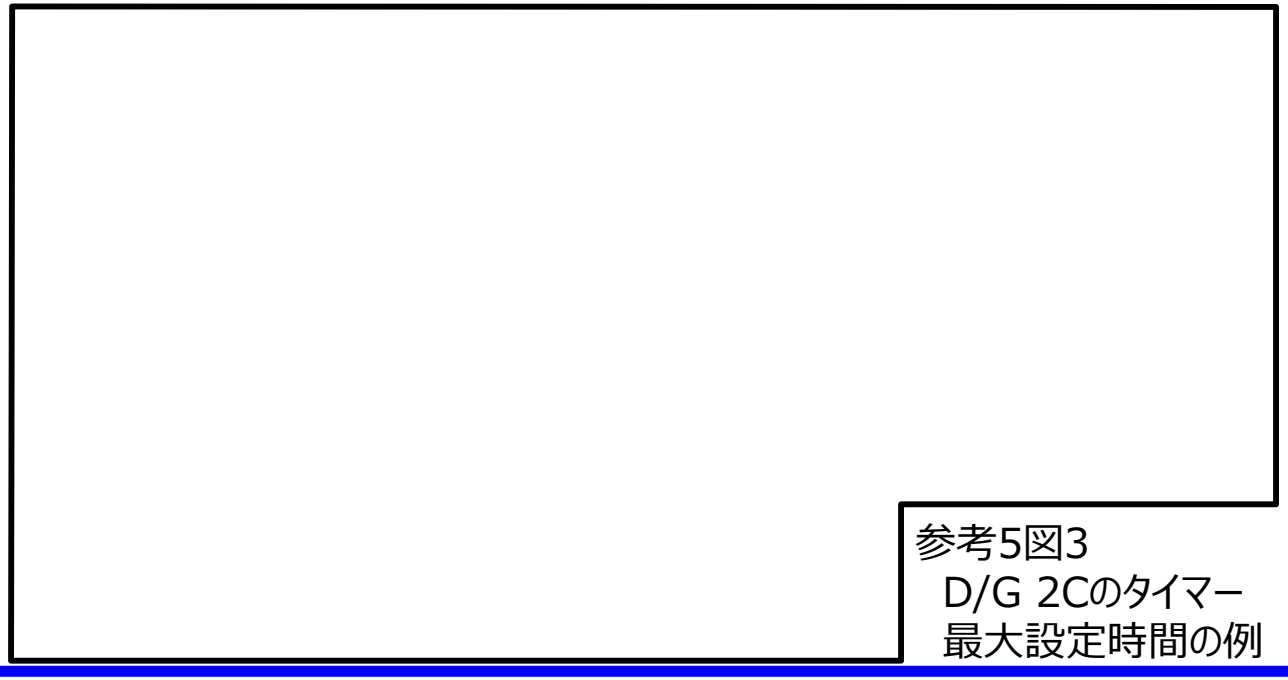
参考5図1　HEAF対策後のD/Gインターロック図（HEAF対策前後）

参考5.2　タイマーの設定時間

- タイマーは，外部故障時にタイマー設定値以内にD/G受電遮断器を開放し，短絡電流を遮断できた場合は，機器保護の観点から不要なD/G給電中の界磁開閉器（消磁コンタクタ）投入を防止するとともに，　D/G受電遮断器にてHEAFが発生した場合は，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1.0 sに設定する（参考5図2及び参考5図3参照）。



参考5図2
D/G 2Cのタイマー
最小設定時間の例



参考5図3
D/G 2Cのタイマー
最大設定時間の例

- タイマーの設定時間を1.0 sとすると，D/G 2Cの短絡電流減衰曲線は参考5図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することができる。

参考5図4　D/G 2Cの短絡電流減衰曲線
（タイマー設定値1.0 sの場合）

参考5.3　インターロック追加による悪影響を防止するための設計上の考慮

➢ 追加するインターロック回路の故障によるD/Gへの悪影響に対する設計上の考慮
- D/G　50及びタイマーの故障によってD/Gの安全機能が阻害されることがないよう，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。

➢ 自然現象等を起因とした悪影響に対する設計上の考慮
- 「地震」に対しては，追加するD/G　50等は耐震Sクラスの構造強度を有するD/G制御盤内に既設電気器具と同じ方法で取付け，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，D/G　50等の機能確認済加速度は，盤設置レベルの評価用加速度よりも大きくなる設計とすることで，地震によって故障（機能喪失）することがない設計とする。

- 「津波，外部からの衝撃，火災，蒸気タービン・発電機等の飛散物」に対しては，追加するD/G　50等は，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，追加するD/G　50等はD/G制御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。

参考６　先行審査プラントと東海第二発電所のHEAF対策比較（1／3）

➢ 東海第二発電所のHEAF対策については，非常用電源設備の基本設計方針に示すとおり，遮断器の遮断時間の適切な設定，D/Gの停止等により対策を実施するものであり，先行審査プラントと差異はない。しかし，LOCA信号発信時等におけるD/G停止の設計思想や，D/G停止のインターロック等が異なるため，先行審査プラントのHEAF対策を組み合わせた対策としている。そのため，先行審査プラントの状況を整理するとともに，東海第二発電所のHEAF対策との比較をした結果を以下に示す。

①先行審査プラント（PWR）のHEAF対策

・先行審査プラント（PWR）のHEAF対策は，既存の設計思想が，既存の過電流継電器（51）が動作してもSI信号発信時は事故対応を優先し，D/Gが停止せず，D/G受電遮断器も「開」とならないことから，既存の過電流継電器（51）でHEAF対策をする場合，その設計思想を変更する必要がある。そのため，HEAF発生時以外は既存の設計思想を変更しない対策として，過電流継電器（50）を追加するHEAF対策を実施している。

②先行審査プラント（BWR）のHEAF対策

・先行審査プラント（BWR）のHEAF対策は，既存の設計思想がプラントごとに異なるが，既存の過電流継電器（51）が動作した場合，LOCA発生の有無にかかわらずD/G受電遮断器は「開」となる。そのため，その設計思想を変更することなく，既存の過電流継電器（51）にタイマーを追加し，D/G受電遮断器でのHEAF発生時に界磁開閉器（消磁コンタクタ）を投入し，D/Gを停止するインターロックを追加して対策を実施している。

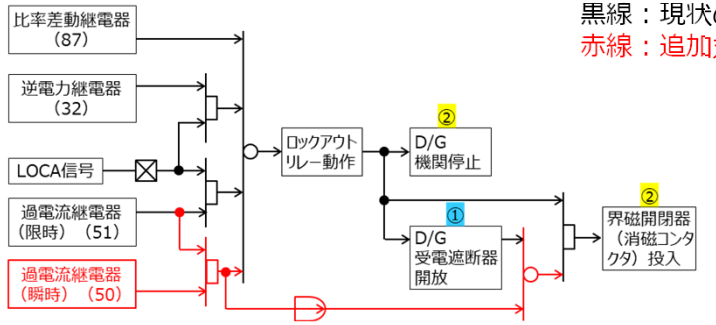
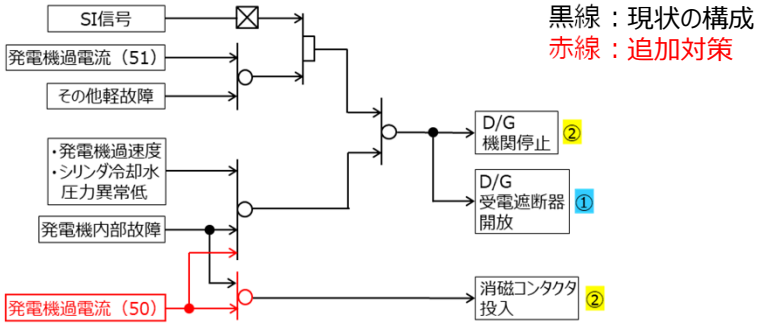
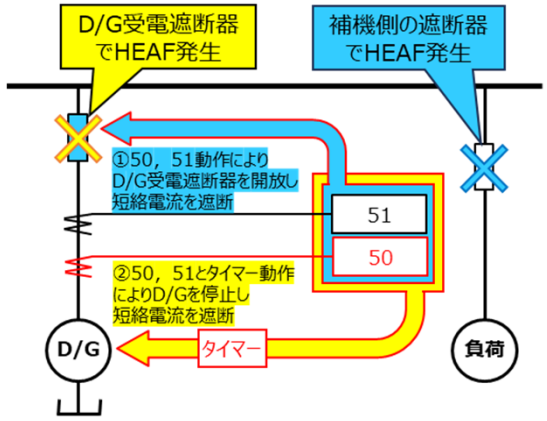
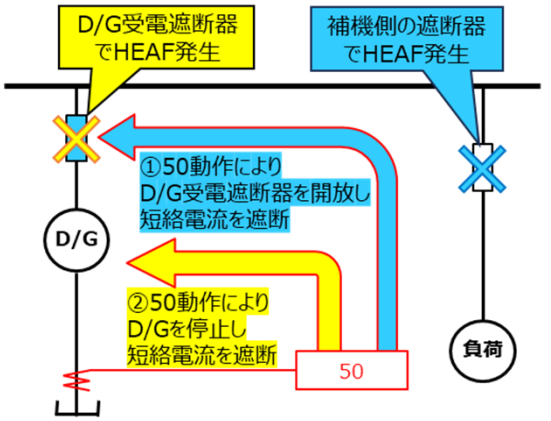
③先行審査プラントと東海第二発電所のHEAF対策の比較

・東海第二発電所は，先行審査プラント（PWR）と同様に，既存のD/G 51が動作しても，LOCA発生時は事故対応を優先し，D/Gが停止せず，D/G受電遮断器も「開」とならない設計思想である。また，先行審査プラント（BWR）とは既存の設計思想は異なるが，プラントの設備構成及び界磁開閉器（消磁コンタクタ）を投入し，D/Gを停止するインターロックは同様である。そのため，東海第二発電所のHEAF対策は，先行審査プラント（PWR）と同様に過電流継電（50）を追加するLOCA発生時におけるHEAF対策と，先行審査プラント（BWR）と同様にタイマーを追加するD/G受電遮断器でのHEAF対策を組み合わせたHEAF対策とする。

先行審査プラントと東海第二発電所のHEAF対策比較を参考6表1に示す。

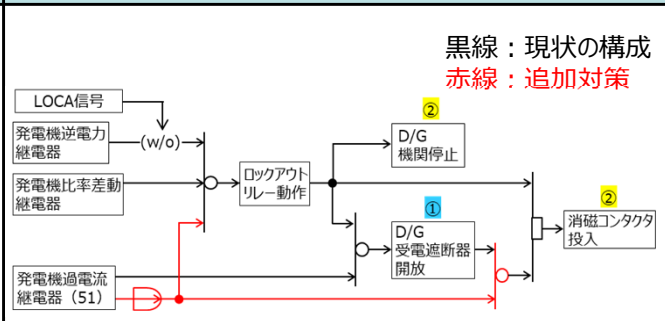
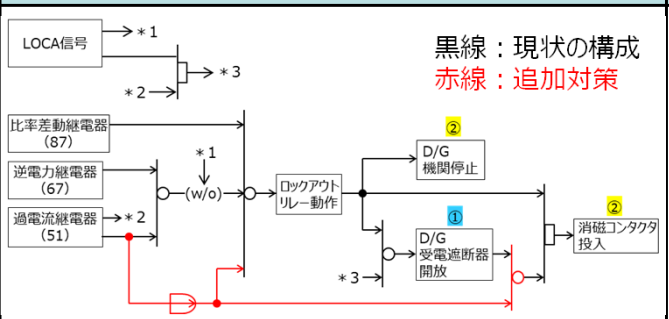
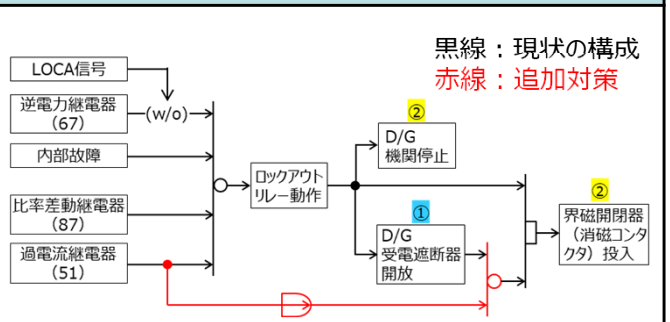
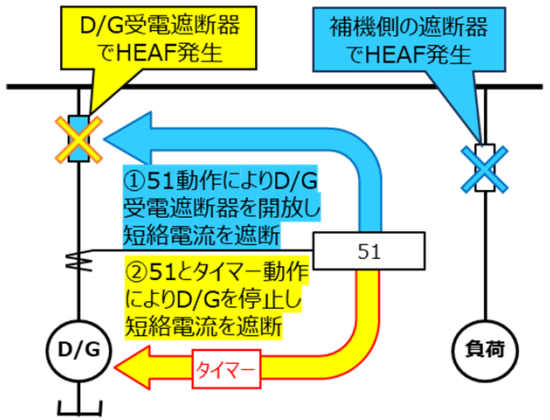
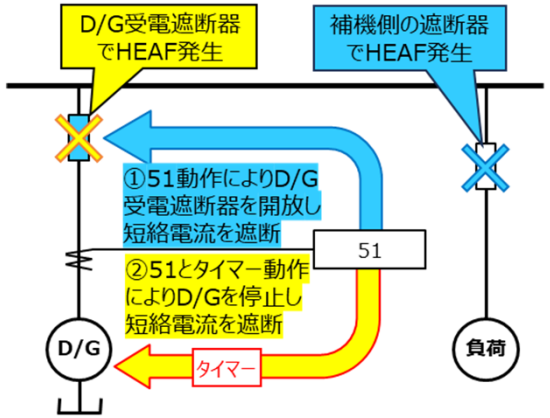
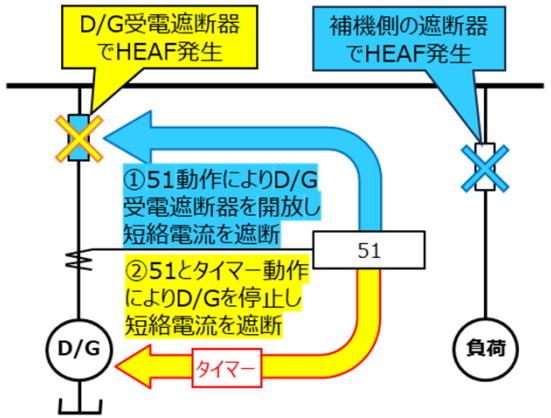
参考６　先行審査プラントと東海第二発電所のHEAF対策比較（2／3）

参考6表1　先行審査プラントと東海第二発電所のHEAF対策比較（1／2）

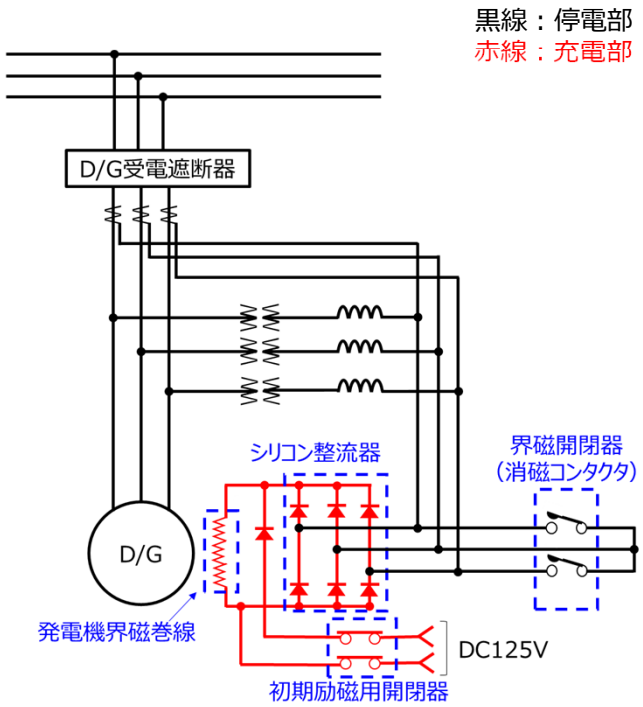
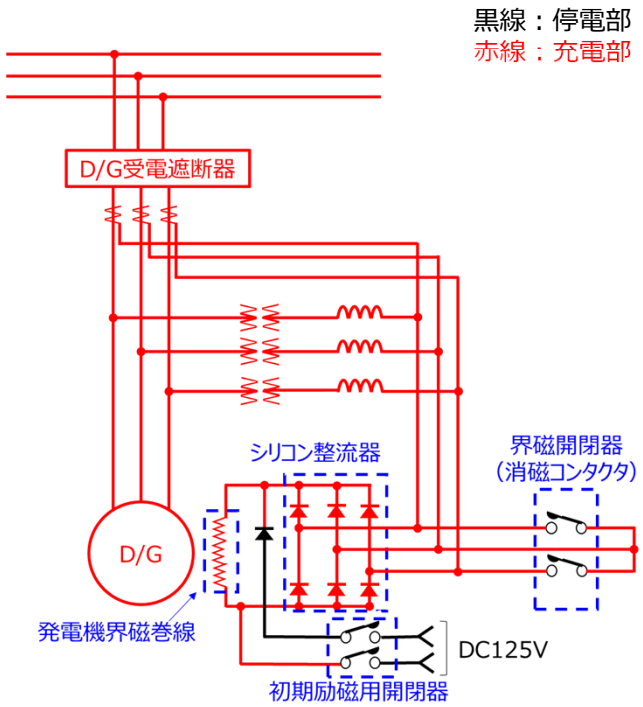
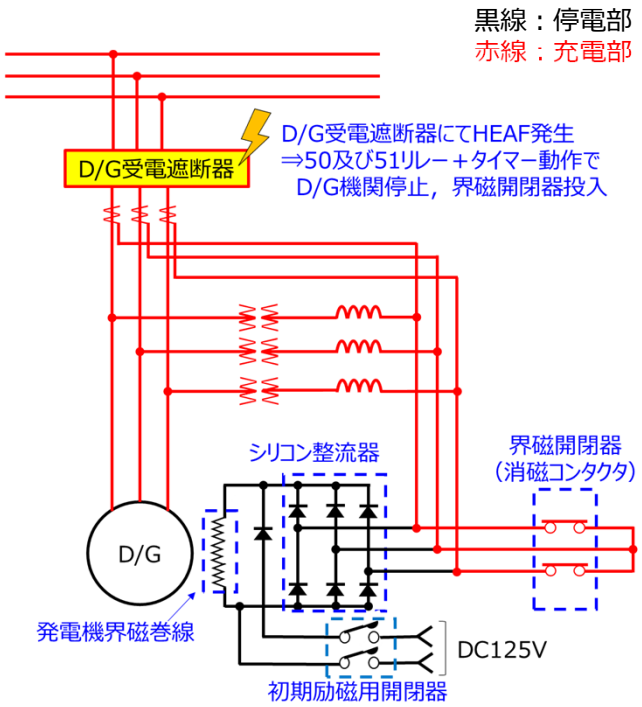
	東海第二発電所（BWR）	先行審査プラント（PWR）
ブロック図		
単線結線図		
HEAF対策	• D/G 50を追加し，既設のD/G 51とD/G 50が動作した場合にはD/G停止（機関停止及び界磁開閉器（消磁コンタクタ）投入）とD/G受電遮断器開放のインターロックを動作させる。また，タイマーを追加し，D/G 50及びD/G 51の動作が一定時間継続した場合には，D/G受電遮断器でHEAFが発生していると捉え，界磁開閉器（消磁コンタクタ）投入のインターロックを動作させることで，設計思想*を変更せずにアーク火災への進展を防止する。 ＊：LOCA発生中においては，既設のD/G 51が動作してもD/Gが停止せず，D/G受電遮断器も「開」とならない。	• 過電流継電器（50）を追加し，当該の過電流継電器（50）が動作した場合には，D/G停止（機関停止及び消磁コンタクタ投入）とD/G受電遮断器開放のインターロックを動作させることで，設計思想*を変更せずにアーク火災への進展を防止する。 ＊：SI信号発信時においては，既設の過電流継電器（51）が動作してもD/Gが停止せず，D/G受電遮断器も「開」とならない。 • 東海第二発電所において，先行審査プラント（PWR）を採用する場合，過電流継電器（50）を追加するだけでは，補機側の過電流継電器（50）との保護協調が取れず，不要トリップの懸念がある。

参考６　先行審査プラントと東海第二発電所のHEAF対策比較（3／3）

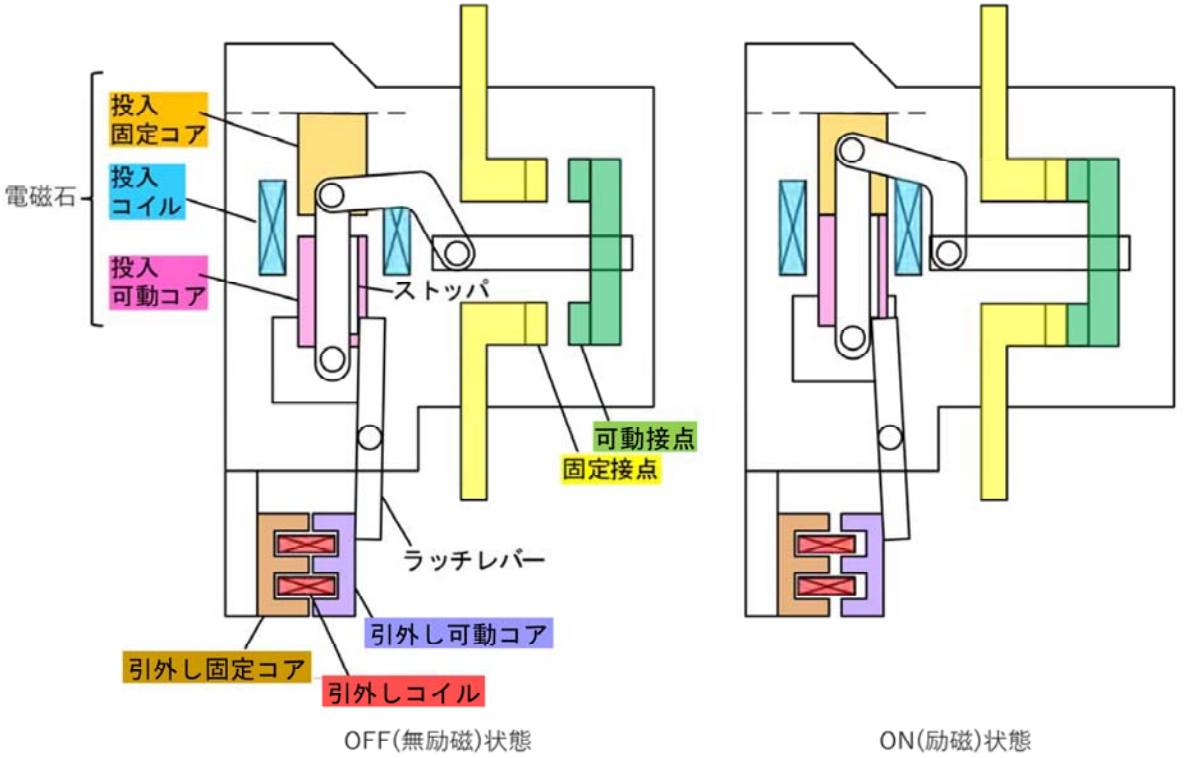
参考6表1　先行審査プラントと東海第二発電所のHEAF対策比較（2／2）

	先行審査プラント（BWR①）	先行審査プラント（BWR②）	先行審査プラント（BWR③）
ブロック図			
単線結線図			
HEAF対策	• 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（機関停止及び消磁コンタクタ投入）のインターロックを動作させることで，設計思想＊を変更せずにアーク火災への進展を防止する。 ＊：既設の過電流継電器（51）が動作した場合，LOCA発生の有無にかかわらずD/G受電遮断器のみ「開」とする。 • 東海第二発電所において，先行審査プラント（BWR①）を採用する場合，既設の過電流継電器（51）のみの動作で，LOCA発生中においてもD/Gが停止し，D/G受電遮断器が「開」となることから設計思想を変更する必要がある。	• 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（機関停止及び消磁コンタクタ投入）のインターロックを動作させることで，設計思想＊を変更せずにアーク火災への進展を防止する。 ＊：既設の過電流継電器（51）が動作した場合，LOCA発生時はD/G受電遮断器のみ「開」とするが，LOCA発生時以外はD/Gを停止し，D/G受電遮断器を「開」とする。 • 東海第二発電所において，先行審査プラント（BWR②）を採用する場合，既設の過電流継電器（51）のみの動作で，LOCA発生中においてもD/Gが停止し，D/G受電遮断器が「開」となることから設計思想を変更する必要がある。	• 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，消磁コンタクタ投入のインターロックを動作させることで，設計思想＊を変更せずにアーク火災への進展を防止する。 ＊：既設の過電流継電器（51）が動作した場合，LOCA発生の有無にかかわらずD/Gを停止し，D/G受電遮断器を「開」とする。 • 東海第二発電所において，先行審査プラント（BWR③）を採用する場合，既設の過電流継電器（51）のみの動作で，LOCA発生中においてもD/Gが停止し，D/G受電遮断器が「開」となることから設計思想を変更する必要がある。

参考7表1　界磁開閉器（消磁コンタクタ）回路図

	D/G起動時	D/G運転中	界磁開閉器（消磁コンタクタ）投入時
回路図			
動作概要	・D/G起動時は，DC125V電源から発電機界磁巻線に電流を供給する。	・D/Gが起動完了すると，初期励磁用開閉器が開放され，DC125V電源からの電流の供給は停止し，発電機から電流を供給する。	・界磁開閉器（消磁コンタクタ）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の供給が停止し，発電機の回転磁界が減衰する。 ・したがって，D/G機関停止とともに界磁開閉器（消磁コンタクタ）が投入されれば，短絡電流は急速に減衰する。

- 界磁開閉器（消磁コンタクタ）は投入コイル，投入固定コア，投入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，可動接点などの主要部品で構成されている（参考7図1参照）。



参考7図1　界磁開閉器（消磁コンタクタ）構造図

＜界磁開閉器（消磁コンタクタ）の動作原理＞

- OFF（無励磁）状態では，引外しコイル，引外し固定コア，引外し可動コアにより固定接点と可動接点は開離しており，電流が負荷に流れない状態となっている。
- 投入コイルを励磁（電圧印加）すると，投入可動コアが投入固定コアに吸引され，これ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，界磁開閉器（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7表1参照）。

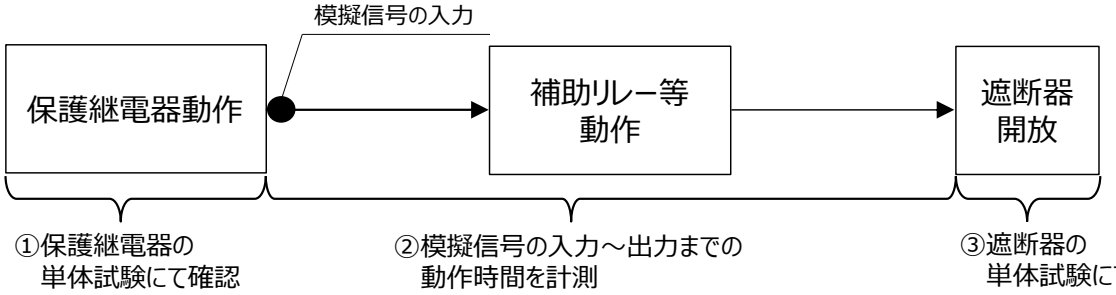
参考８　D/G機関の停止による短絡電流供給停止までの代替検査について

➢ 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

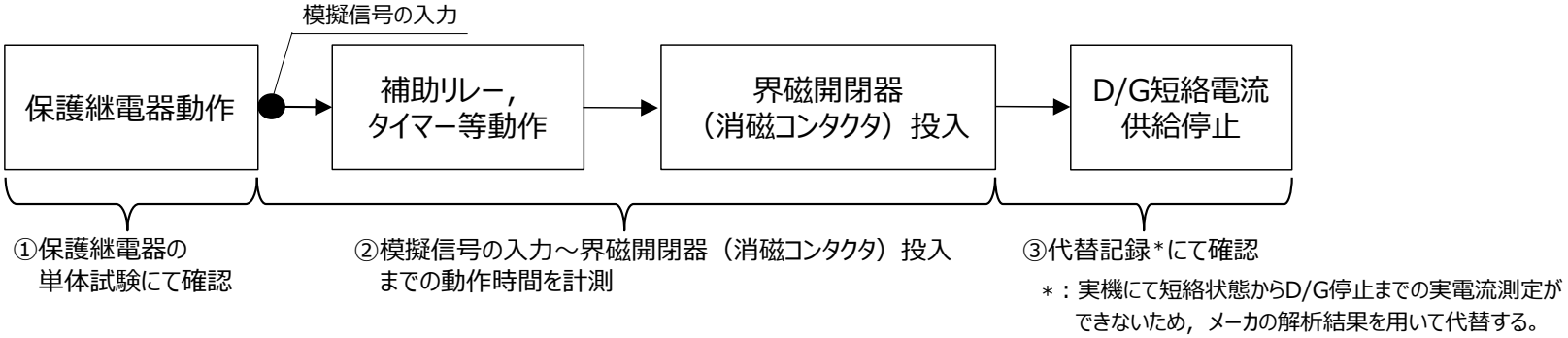
設計基準対象施設は、その健全性及び能力を確認するため、発電用原子炉の運転中又は停止中に必要な箇所の保守点検（試験及び検査を含む。）ができるよう、施設しなければならない。

➢ 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発生時



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

➢ パターン2：D/G受電遮断器でのHEAF発生時



参考8図2　D/G受電遮断器でのHEAF発生時

- パターン1については，①は保護継電器の単体試験での動作確認・動作時間計測を行い，②は補助リレーへの模擬信号入力から出力までの動作確認・動作時間計測を行い，③は遮断器の単体試験での動作確認・動作時間計測を行う。
- 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，メーカの解析結果を用いて代替する。