

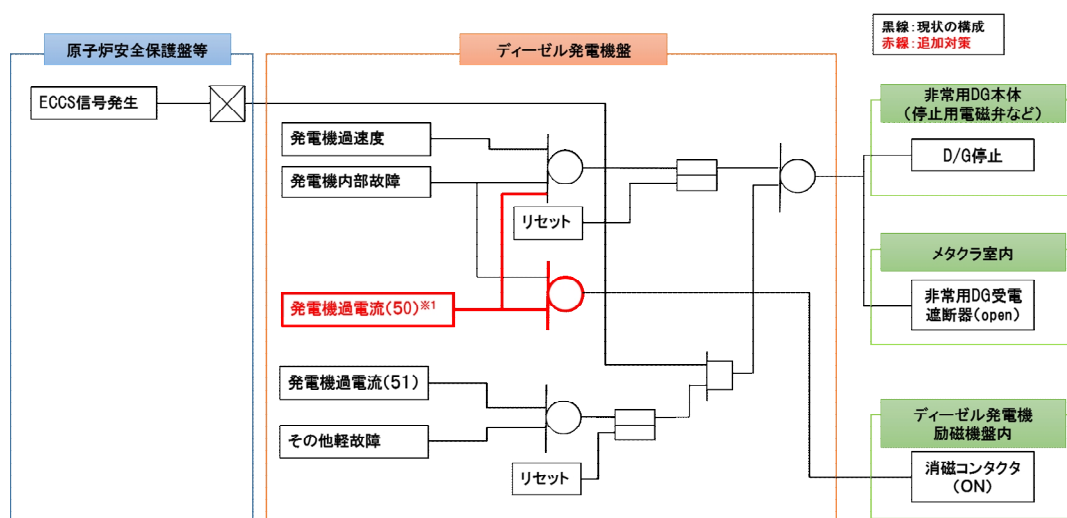
非常用 DG 保護ロジックへの 50 保護リレー追加に関わる既存設備への影響について

1. はじめに

非常用 DG 保護ロジックへの 50 保護リレーの追加において、既存設備への影響確認を実施するものである。

2. 50 保護リレー追加における回路構成について

今回の当該保護リレーにおける追加ロジック、回路構成の概略イメージについて高浜3, 4号機を一例として図1の通り示す。(盤名称の違い等はあるが、大飯3, 4号機についても同様の回路構成である。)



※1: 今回のHEAF対策用の50保護リレー追加については、原子炉安全保護盤、安全保護系シーケンスキャビネット及び安全保護系ストラック内のSI信号既存ロジックを変更するものではなく、ディーゼル発電機盤内の保護リレー追加ならびに非常用DG側の保護ロジックに重複扱いとして50保護リレーのロジック追加をするものである。

図1 回路構成概略図(イメージ)

図1に示す通り、当該保護リレー追加は SI 信号ロジックを変更するものではなく、ディーゼル発電機盤内に 50 保護リレーを追加し、非常用 DG 側のロジック回路を一部追加するものである。

なお、既存のディーゼル発電機盤内に追加し、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。また、本ロジックについては、既許可の設計を変更するものでもない。

【50 保護リレーロジック追加設計の考え方】

1. 非常用 DG 受電遮断器での HEAF 発生に起因した短絡電流を早期に検出することを目的としている。
2. 追加する 50 保護リレーについては、SI 時においても HEAF による電気盤の損壊の拡大

防止を優先する必要があるため、現状の 51 保護リレー（発電機過電流要素）とは別に保護リレーをディーゼル発電機盤内に追加し、重故障扱いとする。

⇒従い、50 保護リレー動作で非常用 DG 受電遮断器開放、非常用 DG 機関の停止となる。

- 上記に加え、アークエネルギー抑制の観点から、非常用 DG 機関の停止後速やかに HEAF 発生点である非常用 DG 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、50 保護リレー動作で非常用 DG の消磁コンタクトを投入する。

なお、非常用 DG 用の具体的な HEAF 対策検討については、添付1参照。

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50保護リレーは、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2に示す通り、87保護リレーの保護範囲の延長線上にある非常用 DG 受電遮断器での電気事故を保護^{注1}するものであり、87保護リレーと同じ設計思想（1/1 ロジックで動作）とするのが妥当である。また、この設計の考え方については、母線側の保護リレーの設計思想（メタクラ安全系補機の50-51保護リレー等は 1/1 ロジックで動作）とも整合している。

注1: 発電機内部故障（87）は非常用 DG 発電機から非常用 DG 受電遮断器までの電路を保護範囲としており、50保護リレーについては、87保護範囲を含め非常用電源系統（非常用 DG 受電遮断器を含む）を保護範囲としている。

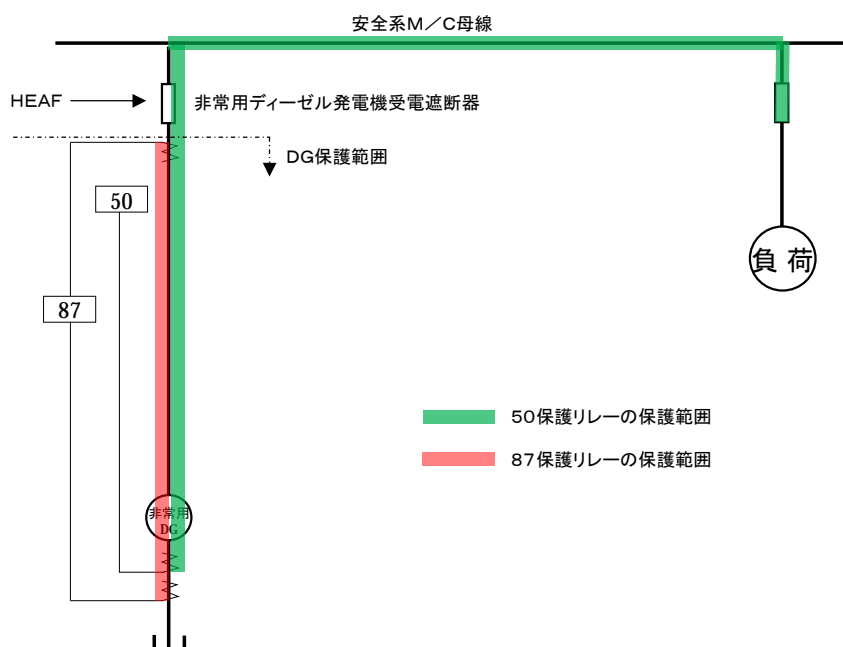


図2 50保護リレーと87保護リレーの保護範囲のイメージ図

4. HEAF 対策用に追加した当該リレーにおける非常用 DG 受電遮断器誤開或いは非常用 DG 誤トリップへの影響について

非常用 DG 運転中に万一当該リレーの誤動作が発生した場合、機関の停止回路が動作し、或いは非常用 DG 遮断器が開放され、非常用 DG からの給電が停止する可能性が考えられる。

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 カ年 49 基データ改訂版)』(添付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。

当該リレー誤動作による機関の停止については、“非常用ディーゼル発電機の計測制御回路”として当該リレーを非常用 DG のバウンダリに含めて取り扱っている※1。すなわち、非常用 DG の故障率には、当該リレーの要因による故障率も含まれているため、当該リレー設置によるプラントの信頼性評価への影響はない※2。

※1 PRA で使用している NUCIA の故障率データは、国内 PWR 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ます。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ます。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ます。そのため、当該機器の故障率に含まれます。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ません。そのため当該機器の故障率には含まれません。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 頁に非常用 DG 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」が挙げられています。「冷却水流量、潤滑油圧力、機関速度等」といった故障要素は非常用 DG 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す。当該 50 リレーにつきまし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非常用 DG 故障ロックアウトリレーを動作させることから、当該 50 リレーについても先の保護信号用の保護リレーと同様に非常用 DG バウンダリ内の設備と整理され则认为します。

※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 PWR 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ます。よって、過去の実績に基づくものなので、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ありません。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ります。

なお、仮に非常用 DG の故障率とは別に当該リレ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 ヵ年 56 基データ)』(添付3参照。)によれば、“非常用ディーゼル発電機の運転継続失敗”の発生頻度($3.3 \times 10^{-4}/\text{hr}$)に対し、リレー誤動作の発生頻度($3.0 \times 10^{-9}/\text{hr}$)は十分に小さいものであり、非常用 DG の信頼性に有意な影響を与えることはないと考える。

さらに、当該リレーの誤動作により、非常用 DG 遮断器の誤開によって間接的に非常用 DG の給電失敗に至るシーケンスも考えられるが、この場合も当該リレーは信頼性評価上、遮断器のバウンダリに含まれることから、当該リレーの設置が信頼性評価に影響することはない。前述と同様に仮に遮断器の故障率とは別に当該リレ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前述の NUCIA データでの遮断器誤開の発生頻度($3.8 \times 10^{-8}/\text{hr}$)に対し、リレー誤動作の発生頻度($3.0 \times 10^{-9}/\text{hr}$)は一桁小さいものであり、この観点からも当該リレーの追加は非常用 DG の機能に対し、信頼性の面では有意な影響を与えることはないと考える。

5. 保護リレー故障による非常用DGへの設計上の考慮について

プラント事故時に非常用 DG にて給電している際において、万が一保護リレーの故障によって非常用 DG 機関が停止した場合には、安全系電源系統は、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、当該片系の保護リレーが故障したとしても、健全側の非常用 DG にて事故の収束は可能である。

また、プラント運転時の際に非常用 DG に関わる当該保護リレーが万が一故障した場合においては、保安規定上の制限(高浜発電所保安規定第 74 条)により10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)での復旧が必要となる。

当該保護リレーの故障については、自己診断機能が備わっており、故障警報を発信する設計となっており、措置としては、リレーケースを引抜するためのスイッチを設けており、本スイッチにより CT 回路を短絡させ、保護リレーを単独で交換できる。

保護リレー故障時の取替期間については、以下の内訳の通り、作業準備、予備品の運搬にかかる時間、作業員の要請にかかる時間、取替作業時間等を考慮し、約 10 時間程度で取替が可能であると考える。

- ・作業準備: 1 時間
- ・予備品の運搬: 1. 5 時間
- ・作業員の要請: 6. 5 時間
- ・取替作業: 1 時間

なお、運転中に定期的実施する非常用ディーゼル発電機の無負荷試験の際に保護リレ

一故障に伴う誤動作で非常用 DG 機関の停止となった場合には、当該保護リレーの交換とともに、停止信号をリセット後、非常用 DG を再起動できる。

◇高浜発電所 保安規定(抜粋)(大飯発電所も同様記載)

[保安規定第 74 条](大飯発電所については、79 条)

(ディーゼル発電機 -モード1、2、3および4-)

第 74 条 モード 1、2、3 および 4 において、ディーゼル発電機は、表 74-1 で定める事項を運転上の制限とする。

2. 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) 発電室長は、定期検査時に、次の事項を確認する。

(a) 模擬信号によりディーゼル発電機が起動し、10 秒以内にディーゼル発電機の電圧が確立すること。

(b) ディーゼル発電機に電源を求める機器が、母線電圧確立から所定の時間内に所定のシーケンスに従って順次負荷をとることができること。

(c) (b)における所定負荷のもとにおいて、ディーゼル発電機が電圧 $6,900 \pm 345$ V および周波数 60 ± 3 Hz で運転可能であること。

(2) 当直課長は、モード 1、2、3 および 4 において、1ヶ月に1回、2基のディーゼル発電機について、待機状態から起動し、無負荷運転時の電圧が $6,900 \pm 345$ V および周波数が 60 ± 3 Hz であることならびに引き続き非常用高圧母線に並列して定格出力で運転可能であることを確認する。

(3) 当直課長は、モード 1、2、3 および 4 において、1ヶ月に1回、燃料油サービスタンク貯油量を確認する。

3. 当直課長は、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 74-3 の措置を講じる。

表 74-1

| 項目 | 運転上の制限 |
|------------------------|---|
| ディーゼル発電機 ^{※1} | (1) ディーゼル発電機 2 基が動作可能であること ^{※2} (2) 燃料油サービスタンクの貯油量が表 74-2 に定める制限値内にあること ^{※3} |

※1：3号炉および4号炉のディーゼル発電機は、重大事故等対処設備を兼ねる。

3号炉または4号炉のディーゼル発電機が動作不能時は、第 85 条 (表 85-15) の運転上の制限も確認する。

※2：予備潤滑運転(ターニング、エアラン)を行う場合、運転上の制限を適用しない。

※3：ディーゼル発電機が運転中および運転終了後の 24 時間は、運転上の制限を適用しない。

表 74-2

| 項目 | 制限値 | |
|---------------|------------------------|------------------------|
| | 1号炉および2号炉 | 3号炉および4号炉 |
| 燃料油サービスタンク貯油量 | 0.60 m ³ 以上 | 1.10 m ³ 以上 |

| (保有油量) | | |
|--|---|---------------------------------|
| 表 7 4 - 3 | | |
| 条 件 | 要求される措置 | 完了時間 |
| A. ディーゼル発電機 1基が動作不能※ ⁴ である場合 | A.1 当直課長は、当該ディーゼル発電機を 動作可能な状態に復旧する。 および A.2 当直課長は、残りのディーゼル発電機 を起動（無負荷運転）し、動作可能で あることを確認する。 | 10日 4時間 その後の1日 に1回 |
| B. 条件Aの措置を完 了時間内に達成で きない場合 | B.1 当直課長は、残りのディーゼル発電機 を運転状態（負荷運転）にする。 および B.2 当直課長は、当該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 |
| C. ディーゼル発電機 1基が動作不能で ある場合 および 動作可能な外部電 源が1回線である 場合 | C.1 当直課長は、動作不能となっているデ ィーゼル発電機1基または外部電源1 回線を復旧する。 | 12時間 |
| D. 条件BまたはCの 措置を完了時間内 に達成できない場 合 | D.1 当直課長は、モード3にする。 および D.2 当直課長は、モード5にする。 | 12時間 56時間 |
| ※4：燃料油サービスタンクの貯油量（保有油量）が制限値を満足していない場合を含む（以下、本条において同じ）。 | | |

6. まとめ

今回の 50 保護リレー追加は、HEAF 対策用に重故障扱いとして非常用 DG の停止を実施するものであり、また当該リレーについては、非常用 DG 盤内に設置することから、既存の SI 信号ロジック等の回路構成を変更するものではなく、耐震や溢水影響についても問題はない。また、50 保護リレーも 87 保護リレーと同様に、DG 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、DG 保護リレー設計と整合した考え方で設計している。(1/1 ロジック:A 系1台、B 系1台)

加えて、既存の信頼性評価上への影響については、既に非常用 DG、遮断器のバウンダリに含まれるので、故障率を加算する必要はなく当該リレーの追加は非常用 DG の機能に対し、信頼性の面では有意な影響を与えることはない。(非常用 DG、遮断器の故障率は国内 PWR プラント全体の故障実績に基づいて算出されたものを適用しているため、個々のプラントにおいて非常用 DG、遮断器のバウンダリ内の部品構成/台数に変更があった場合でも、非常用 DG、遮断器の故障率には影響はない)。

なお、既存の信頼性評価上の扱いは上述のとおりですが、当該リレーを追設したことで現実的にどの程度のリスクがあるのかを推定するために、あえて当該リレーをバウンダリ内に含めず保守的に加算するのであれば、以下のとおり単純な加算となるがリレー誤動作の発生頻度($3.0 \times 10^{-9}/\text{hr}$)は一桁小さいものであり、非常用 DG の機能に対し、信頼性の面では有意な影響を与えることはない。

・遮断器の例: $3.8 \times 10^{-8}/\text{hr} + 3.0 \times 10^{-9}/\text{hr}(=0.3 \times 10^{-8}/\text{hr}) = 4.1 \times 10^{-8}/\text{hr}$

さらに、追加する 50 保護リレーについては、メタルクラッド開閉装置等に既設で設置されており十分な使用実績があり、これまで誤作動は起きておらず、また、類似の 87、51 保護リレーについても誤作動は起きていない。

以上より、当該 50 リレーは母線保護リレーなどと同様に十分に信頼性が高いことから、非常用 DG に悪影響を与えることはない。

以上

非常用 DG 給電時の HEAF 火災対策の検討について

1. はじめに

非常用 DG 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1に非常用 DG から安全系母線に給電する場合の概略電源構成を示す。HEAFは、非常用 DG 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1に示す事故点1, 2となる。

事故点1: 補機フィーダ遮断器での短絡事故

事故点2: 非常用 DG 受電遮断器での短絡事故

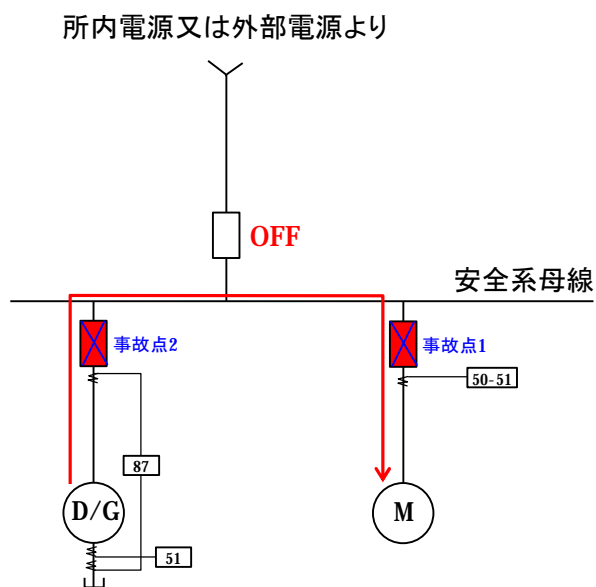


図1 安全系母線への非常用 DG 給電時概略電源構成

3. 通常保護の考え方

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

なお、非常用 DG 給電時においては、SI 信号が同時に発信していることが考えられ、SI 信号発信時には保護のインターロックが異なるケースがあることから、SI 信号発信有無に分けて保護方法を検討する。

事故点1:

非常用 DG 給電時に補機フィーダ遮断器にて事故が発生した場合、フィーダー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。従い、図2に示す通り非常用 DG 用の過電流保護 51 リレーにて短絡電流を検知し、非常用 DG 受電遮断器を開放し短絡電流を遮断することで、HEAF からの保護を行う。

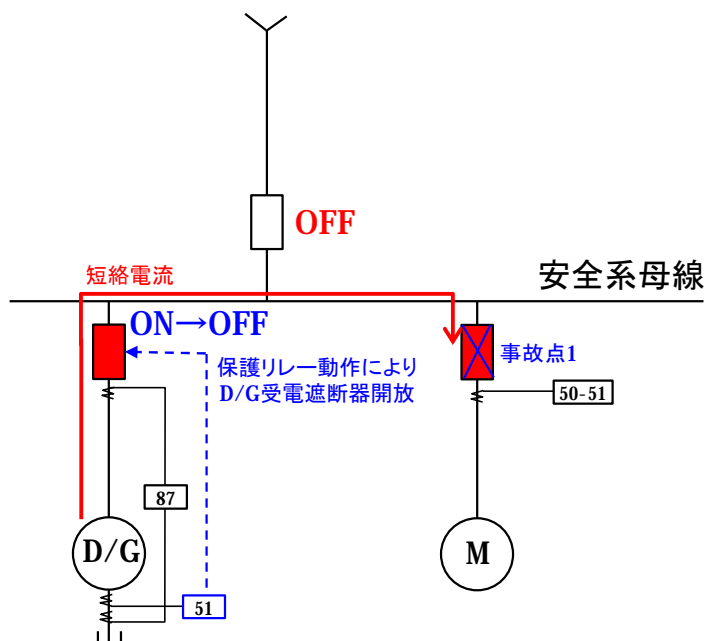


図 2 補機フィーダ遮断器での短絡時(事故点 1)における HEAF 保護

<SI 信号発信無し>

非常用 DG 用の過電流保護 51 リレーには 50(瞬時)要素がなく、短絡電流(HEAF)保護は 51 要素にて行う。プラント毎の整定値によるが現状の 51 要素の動作時間では HEAF 保護ができない可能性がある。

<SI 信号発信有り>

SI 信号発信時には非常用 DG 用の過電流保護 51 リレー動作による非常用 DG 受電遮断器開放はブロックされるため、SI 時には短絡電流は供給され続けることとなり、HEAF 保護は不可となる。

事故点2:

非常用 DG から給電中に非常用 DG 受電遮断器にて事故が発生した場合、図 3 に示す通り非常用 DG 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、非常用 DG 受電遮断器は故障していることを想定する。従い、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、非常用 DG 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。

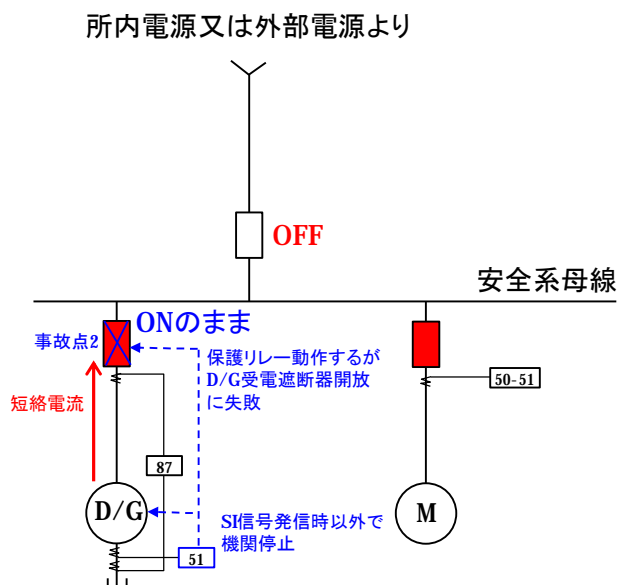


図 3 非常用 DG 受電遮断器での短絡時(事故点 2)における HEAF 保護

<SI 信号発信無し>

短絡電流は事故点に向かって供給され続けることになるが、非常用 DG 用過電流保護 51 リレー動作により、非常用 DG 機関の停止信号が発信されることにより、非常用 DG 機関の停止に伴い短絡電流の供給はなくなるが、短絡電流の減衰時間によっては HEAF の保護が出来ない可能性がある。

<SI 信号発信有り>

非常用 DG 用過電流保護 51 リレー動作による非常用 DG 機関の停止信号は、SI 信号発信時にはブロックされるため、SI 時には短絡電流は供給され続けることとなり、HEAF の保護は不可となる。

4. HEAF 対策の検討

3 項にて検討した通常の保護の考え方と現状での HEAF 保護可否を表1の通りまとめる。

表1 事故点毎における通常保護方法とHEAF保護可否

| 事故点 | 通常保護方法 | HEAF 保護可否 | | 課題 |
|-----|-----------------------|-----------|-----|--|
| | | SI無 | SI有 | |
| 1 | 非常用D/G用過電流保護51リレーにて保護 | △ | × | <ul style="list-style-type: none"> ・非常用DG用過電流保護51リレーの動作時間整定値によりアークエネルギーがHEAF火災発生閾値を超える場合は保護不可 ・SI信号発信時はDG受電遮断器開放とならないため保護不可 |
| 2 | 同上 | △ | × | <ul style="list-style-type: none"> ・非常用DG機関停止信号発信後の短絡電流減衰挙動及びDG用過電流保護51リレーの動作時間整定値によりアークエネルギーがHEAF火災発生閾値を超える場合は保護不可 ・SI信号発信時はDG機関停止とならないため保護不可 |

△：構成上の保護は可能であるがアークエネルギーの評価が必要

×：現状の保護構成でHEAF保護不可

表1に示す通り、事故点1における HEAF 発生においては、各プラントでの非常用 DG 給電時の短絡電流値及び非常用 DG 用の過電流保護 51 リレーの動作時間を確認し、アークエネルギーを算出することで詳細に HEAF 保護可否を調査する必要があるが、SI 信号発信無しであれば必要に応じ動作時間を変更する等で HEAF 保護は可能である。一方で、SI 発信時には過電流保護 51 リレー動作による非常用 DG 受電遮断器開放はブロックされるため、HEAF 保護は不可となる。

事故点2における HEAF 発生においては、事故点への短絡電流の供給を停止することができないため、SI 信号発信無しの条件で非常用 DG 機関の停止がなされたとしても短絡電流の減衰時間を考慮すると HEAF 保護ができない可能性がある。更に、SI 信号発信時には非常用 DG 用の過電流保護 51 リレーが動作した場合でも非常用 DG 機関の停止がブロックされるため、HEAF 保護は不可となる。

以上の結果により、HEAF 保護が可能となる対策案を表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2 非常用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/G50 要素追加 | <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 動作で機関の停止、非常用 DG 受電遮断器開放、非常用 DG 消磁コンタクタ ON | 5.3.1項 |
| 2 | D/G51 動作 時間短縮 | <ul style="list-style-type: none"> ・51(限時)要素の動作時間を短縮し、短絡事故早期検知し、HEAF 火災を抑制 ・重故障扱いとし、51 動作で機関停止、受電遮断器開放、DG 消磁コンタクタ ON | 5.3.2項 |
| 3 | D/G27 トリップ 回路追加 | <ul style="list-style-type: none"> ・警報のみである D/G27(低電圧)を重故障扱いとし、27 動作で機関停止、受電遮断器開放、DG 消磁コンタクタ ON | 5.3.3項 |

5. HEAF 保護が可能となる対策案

5.1 対策案1: 非常用 DG50 保護リレーの追加

対策案1は、既存の 51 保護リレーに加えて HEAF 対策として、非常用 DG 用の過電流保護リレーに瞬時要素である 50 要素を追加するものである。

非常用 DG の短絡電流は、非常用 DG の内部リアクタンスが初期過渡リアクタンス→過渡リアクタンス→同期リアクタンスと移行していくに伴い、時間とともに減衰していく。初期過渡及び過渡リアクタンスの段階では、短絡電流は大きく、51 保護リレーの動作時間が遅い場合には、アークエネルギーの火災発生閾値を考慮すると HEAF 火災に至り、保護できないこととなる。

そこで、安全系母線における HEAF 対策と同様に瞬時要素 50 保護リレーを追加することを検討する。動作時間については、下位リレーとなる補機用の 50 保護リレーの動作時間 40msec との保護協調を考慮し、0.3sec 以上で整定することとする。

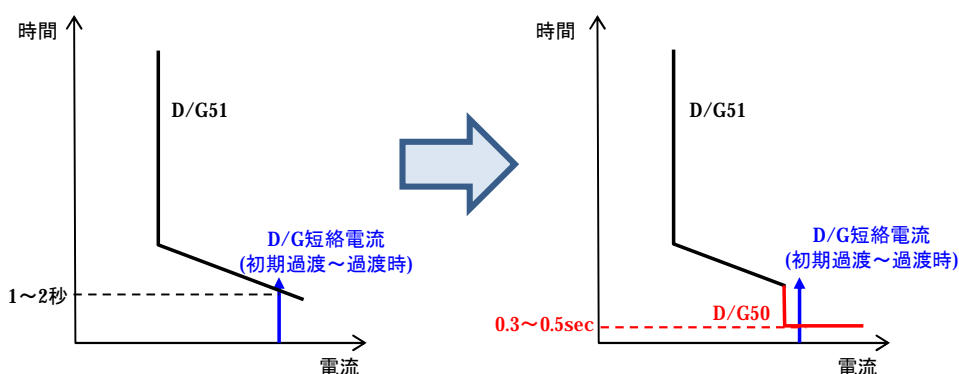


図4 非常用DG50要素追加時の保護リレー整定曲線イメージ

なお、過電流保護 51 リレー動作は非常用 DG 軽故障扱いであり、SI 信号発信時は非常用 DG 受電遮断器開放及び非常用 DG 機関の停止がブロックされるため、SI 時には非常用 DG 受電遮断器における HEAF 発生時の保護が不可であったが、50 保護リレーの動作は 87 保護リレー(非常用 DG の電氣的内部故障)と同様に重故障として扱うことにより、SI 信号発信時においても非常用 DG 機関の停止信号が発信されるため、非常用 DG 受電遮断器にて HEAF が発生した場合の保護も可能となる。

また、同時に非常用 DG 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、非常用 DG 受電遮断器の開放に失敗した場合に非常用 DG 機関の停止に併せて非常用 DG の励磁を断ち、より早期な短絡電流の減衰を図る。

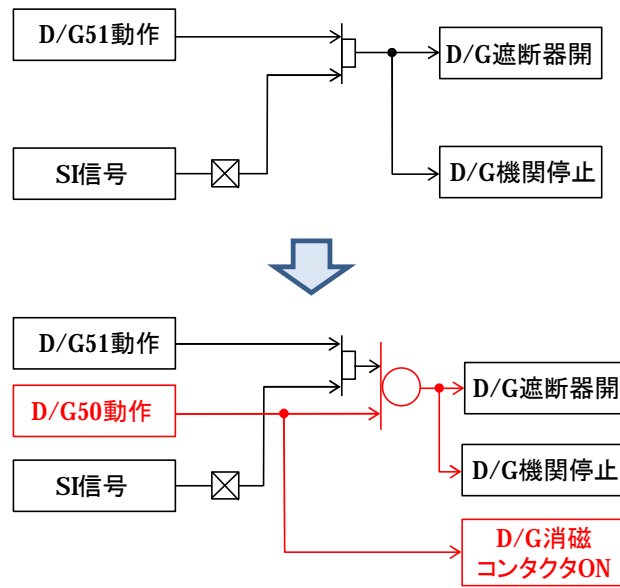


図5 非常用DG50要素追加した場合のD/G過電流保護インターロックイメージ

本対策案の特徴として、SI信号発信時における51保護リレーブロックのインターロックは現状のままとしているため、SI信号発信中の過負荷時(51保護リレーでの保護)には非常用DGからの給電を継続させるという設計思想は変更することなく対策できるものである。

5.2 対策案2: 非常用 DG51 動作時間の短縮

対策案2は、現状設置されている 51 保護リレーの動作時間整定値を短縮することで早期に短絡電流を検知し、HEAF 保護を行うものである。

対策案1と基本的な考え方は同様であり、初期過渡及び過渡リアクタンスとの段階の短絡電流値に対して、現状の動作時間を下位リレーとなる補機用の 50 保護リレー動作時間 40msec との時限協調を考慮して 0.3sec 以上で整定する。

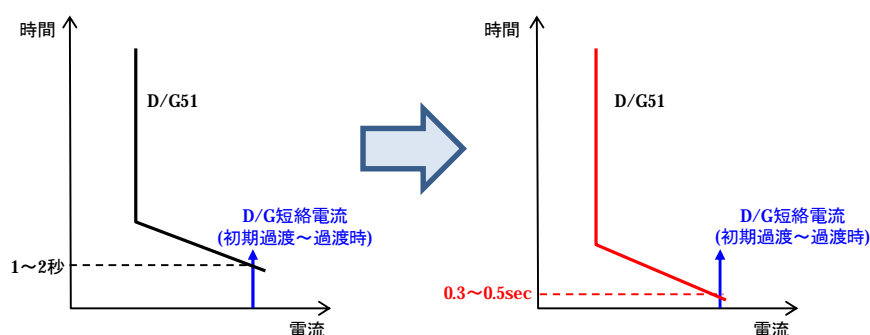


図6 非常用DG51動作時間短縮時の保護リレー整定曲線イメージ

SI 信号発信時には過電流保護 51 リレー動作がした場合でも非常用 DG 機関の停止ブロックとなることから、SI 信号発信時の機関の停止ブロックインターロックを削除する。(非常用 DG51 保護リレー動作を重故障として扱う。)

更に、非常用 DG51 保護リレー動作で非常用 DG 重故障扱いとすることから、非常用 DG の消磁コンタクトもこのとき投入することで非常用 DG 受電遮断器開放に失敗した場合に非常用 DG 機関の停止と併せて非常用 DG の励磁を断ち、より早期な短絡電流の減衰を図る。

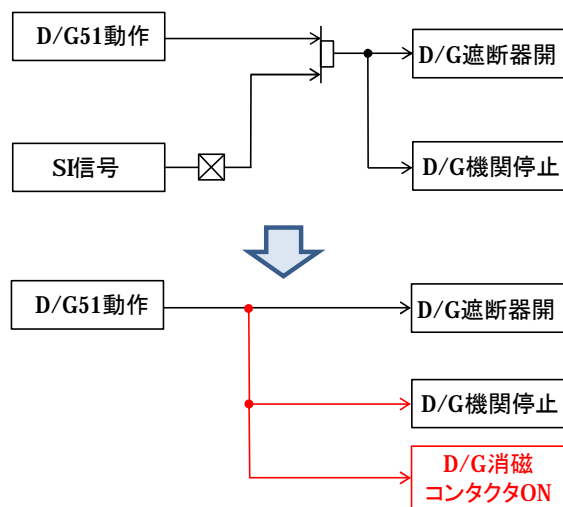


図7 非常用DG51を重故障としたD/G過電流保護インターロックイメージ

本対策案の特徴として、SI信号発信時における51保護リレーブロックのインターロックは削除し、非常用DG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の改造とすることにより、SI信号発信中の過負荷時に非常用DGからの給電を継続させる設計思想を変える対策となる。また、下位リレーとなる最大補機用の50-51保護リレーとの協調を考慮すると、51保護リレー動作特性上、51保護リレーのみではHEAF保護ができるだけの動作時間短縮が困難な可能性がある。

5.3 対策案3: 非常用 DG27トリップ回路の追加

対策案3は、現状設置されている 27 保護リレー(低電圧)要素に重故障回路を追加することで、短絡時の電圧低下を検出して非常用 DG 受電遮断器開放、非常用 DG 機関の停止及び非常用 DG 消磁コンタクタ投入信号を発信し、短絡電流をより早急に減衰させ、HEAF 保護を行うものである。

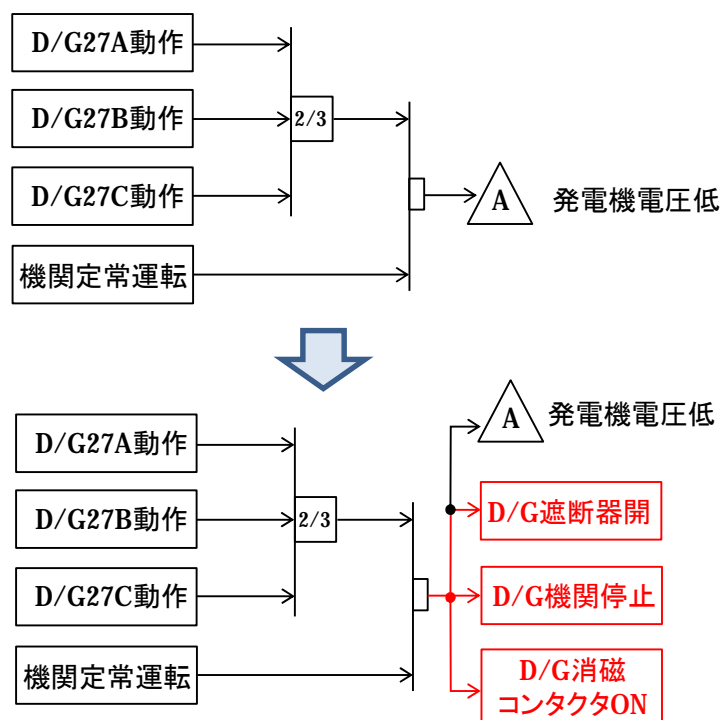


図8 非常用DG27にトリップ(重故障)回路としたD/Gインターロックイメージ

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、非常用 DG 給電時に PC 母線で短絡事故が発生した場合、PC 母線の母線過電流リレーよりも先に非常用 DG27 保護リレーが短絡時の電圧低下を検出し、健全な MC 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、非常用 DG 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。

6. HEAF 対策の検討結果

対策案1～3について、改造物量等を考慮した上での検討結果、各対策案における改造物量は、ハードの改造物量に差はないため、設計思想への干渉及び保護協調上の課題がない対策案1(50 保護リレーの追加)を採用する。

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)

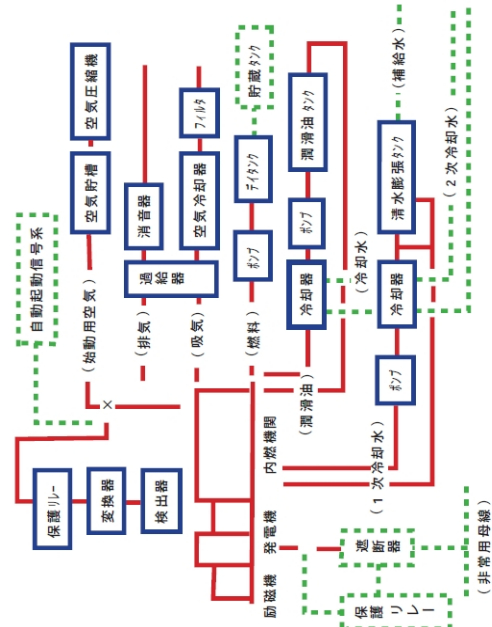
(平成 13 年 2 月 14 日承認)

*1 原子力情報センター 主任研究員

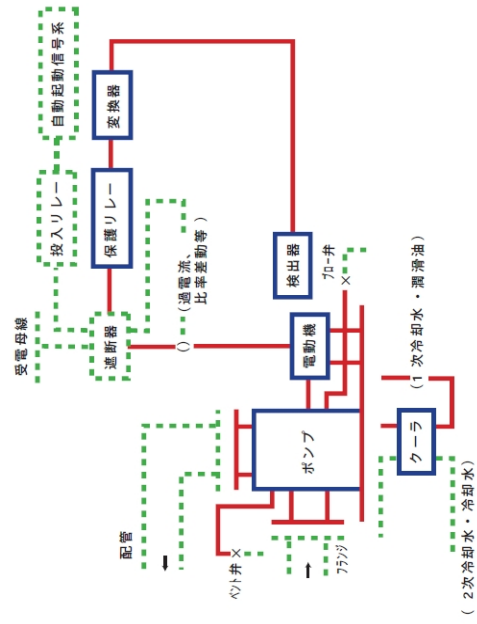
*2 原子力情報センター 研究員

| 項目 | ハウンドタリ内 | ハウンドタリ外 |
|-------------|---|-------------------------------|
| 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 | 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、空気冷却器、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 | ハウンドタリ内 | ハウンドタリ外 |
|----------|----------------------------------|---|
| 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、送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 | 配管のハンガー等 |
| 配管・フランジ等 | 機器側フランジ | 配管側フランジ、ハッキン、ボルト、その他 |
| 接続部 | 熱影響部(機器側) | 溶接部及び熱影響部 |
| 付属弁 | 機器本体に接続されたフロー弁、ベント弁等、及びそこまでの接続配管 | - |



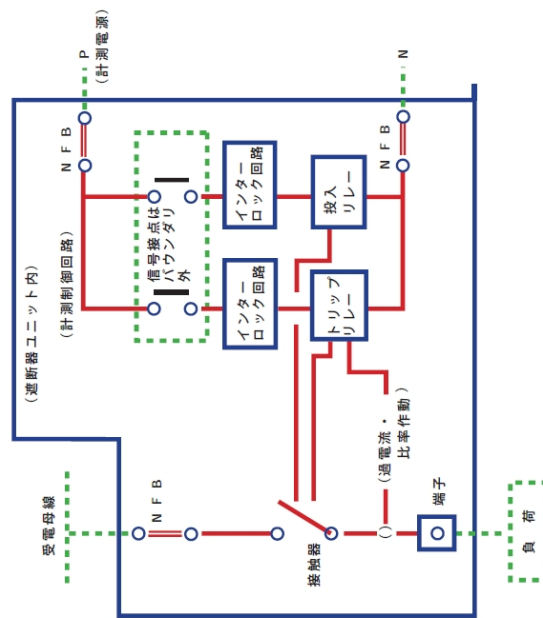
1. 非常用ディーゼル発電機



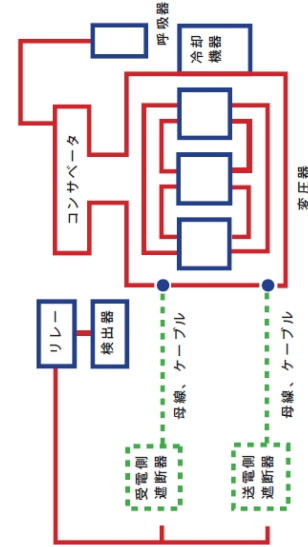
2. 電動ポンプ

| 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 | 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 | 接続部 | ケーブル、母線、遮断器 |



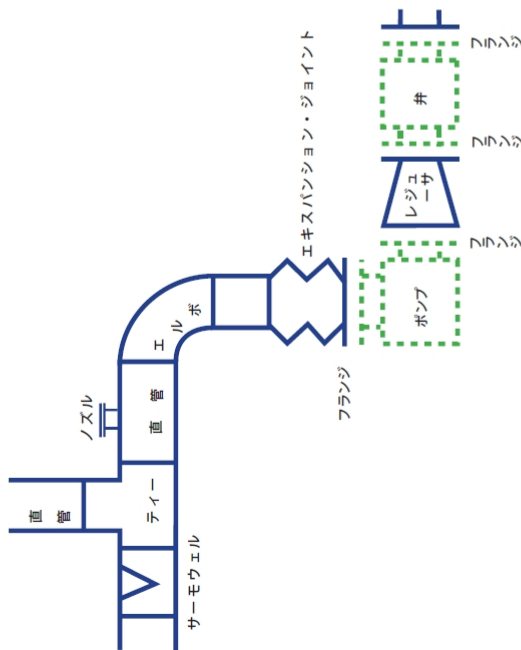
23. 遮断器



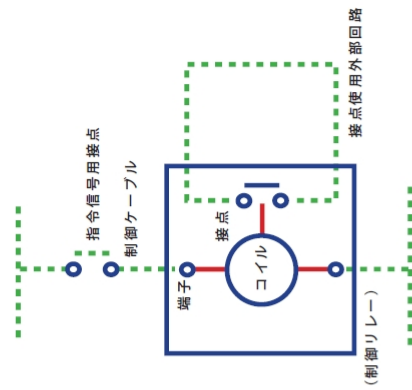
24. 変圧器

| | | |
|--------|--|--------------------|
| 項目 | ハウンドリ内 | ハウンドリ外 |
| 機器本体 | 直管、エルボ、ティー、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 | オリフェイス、ベネトレーション |
| サブポート類 | - | 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 |
| 制御ケーブルとの接続 | 接続端子 | 制御ケーブル |



29. 配管



30. リレー

JANSI-CFR-02

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カ年データ (本報告書推定結果) | | 平均値比 | | EF比 | | 21カ年データ報告書 | | 26カ年データ報告書 | | | | | | |
|-------------|--------------------------------|--------------------|------------------------|-------------|-------------|---------------|------------|------------|----------------------|---------------|------------|-----------|----------------------|---------|---------|---------|
| | | 観測された故障件数 [件] | 平均値 ² [1/h] | 29カ年 / 21カ年 | 29カ年 / 26カ年 | 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) | 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 | 4.0E-07 | 176% | 103% | 31% | 78% | 19 | 1.3E+07 | 4.3E-06 | 6.5 | 46 | 1.6E+07 | 7.3E-06 | 2.5 | |
| | 継続運転失敗 (24時間平均) ^{4,5} | - | 3.3E-04 | 1.7 | 350% | 143% | 98% | - | - | 9.5E-05 | 2.2 | - | - | 2.3E-04 | 1.7 | |
| | 継続運転失敗 (36時間平均) ^{4,5} | - | 2.9E-04 | 1.8 | - | 147% | 98% | - | - | - | - | - | - | 1.9E-04 | 1.8 | |
| | 継続運転失敗 (72時間平均) ^{4,5} | - | - | - | - | 16% | 99% | - | - | - | - | - | - | - | 1.4E-04 | 2.0 |
| | 電動ポンプ (非常用待機、給水) | 5 | 9.0E-07 | 146% | 89% | 13% | 22% | 2 | 6.2E+07 | 1.3E-07 | 17.3 | 4 | 8.0E+07 | 2.2E-07 | 10.2 | |
| | 電動ポンプ (常時運転、給水) | 33 | 1.1E+08 | 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、給水) | 3 | 5.3E-07 | 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、給水) | 2 | 2.0E-07 | 130% | 105% | 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、給水) | 2 | 1.0E-07 | 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、給水) | 1 | 3.9E+06 | 3.4 | 72% | 14% | 13% | 7% | 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 | 185% | 83% | 5% | 27% | 6 | 6.8E+06 | 4.1E-06 | 47.3 | 22 | 8.7E+06 | 9.1E-06 | 8.6 | |
| | 継続運転失敗 | 12 | 1.2E+07 | 136% | 139% | 43% | 42% | 8 | 7.5E+06 | 2.9E-06 | 4.3 | 10 | 1.0E+07 | 2.9E-06 | 4.5 | |
| | 起動失敗 ⁶ | 4 | 1.8E-05 | 82% | 77% | 64% | 81% | 2 | 1.3E-05 | 4.9E-05 | 4.3 | 3 | 1.7E-05 | 5.6E-05 | 3.4 | |
| | 継続運転失敗 ⁷ | - | - | 45% | 56% | 100% | 100% | - | - | 2.6E-03 | 30.0 | - | - | 2.1E-03 | 30.0 | |
| | 電動弁 (給水) | 31 | 1.3E+09 | 137% | 57% | 10% | 21% | 9 | 9.1E+08 | 4.8E-08 | 66.0 | 25 | 1.2E+09 | 1.2E-07 | 27.6 | |
| | 電動弁又は配管 | 0 | 1.3E+09 | 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 | 2.1 | 138% | 162% | 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 | 3.9E+08 | 2.7 | 216% | 74% | 29% | 37% | 0 | 1.1E+08 | 2.5E-09 | 9.4 | 1 | 1.2E+09 | 7.4E-09 | 7.3 |
| | 内部リーク | 2 | 1.3E+09 | 2.4 | 209% | 112% | 18% | 26% | 1 | 9.1E+08 | 4.1E-09 | 13.3 | 2 | 1.2E+09 | 7.7E-09 | 9.2 |
| | 電動弁 (給水) | 3 | 4.9E+07 | 2.4 | 300% | 25% | 32% | 11% | 0 | 3.4E+07 | 8.0E-08 | 7.6 | 2 | 4.4E+07 | 9.9E-07 | 22.4 |
| 空気を動弁 | 電動弁又は配管 | 0 | 4.9E+07 | 34% | 43% | 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 | 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 | 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 | 61% | 76% | 51% | 38% | 0 | 3.4E+07 | 8.0E-08 | 7.6 | 0 | 4.4E+07 | 6.4E-08 | 10.1 | |
| | 電動弁 (給水) | 21 | 7.2E+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 |
| | 電動弁又は配管 | 3 | 7.2E+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 | 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 | 2.8 | 95% | 96% | 13% | 43% | 2 | 4.9E+08 | 1.0E-08 | 21.8 | 4 | 6.3E+08 | 1.0E-08 | 6.4 |
| | 内部リーク | 3 | 7.2E+08 | 2.9 | 86% | 43% | 7% | 13% | 2 | 4.9E+08 | 2.5E-08 | 39.1 | 3 | 6.3E+08 | 4.0E-08 | 21.4 |
| | 電動弁 (給水) | 16 | 1.4E+08 | 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 |
| 油圧作動弁 | 電動弁又は配管 | 4 | 1.4E+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 | 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 | 2.8 | 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 | 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 | 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 | 14.5 | 166% | 28% | 42% | 16% | 4 | 6.5E+08 | 3.4E-08 | 34.4 | 13 | 8.4E+08 | 2.4E-07 | 90.0 |
| | 外部リーク | 0 | 9.5E+08 | 3.5 | 123% | 69% | 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 | 2.3 | 293% | 23% | 14% | 6% | 1 | 6.5E+08 | 7.1E-09 | 16.8 | 4 | 8.4E+08 | 9.0E-08 | 37.3 |
| | 電動弁 (給水) | 6 | 2.1E+09 | 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 | 2.4 | 279% | 206% | 20% | 50% | 0 | 1.5E+09 | 1.7E-09 | 12.2 | 4 | 1.9E+09 | 8.0E-09 | 11.3 |
| 安全弁 | 外部リーク | 0 | 2.1E+09 | 2.4 | 138% | 162% | 14% | 41% | 1 | 1.5E+09 | 3.7E-09 | 17.3 | 1 | 1.9E+09 | 2.3E-09 | 4.7 |
| | 内部リーク | 1 | 2.1E+09 | 2.6 | 219% | 163% | 32% | 51% | 0 | 1.7E+09 | 1.4E-08 | 8.3 | 0 | 2.2E+09 | 1.9E-08 | 5.8 |
| | 閉塞 | 1 | 2.5E+08 | 2.6 | 232% | 113% | 32% | 42% | 0 | 1.7E+09 | 1.4E-08 | 8.3 | 1 | 2.2E+09 | 2.9E-08 | 6.2 |
| | 閉塞 | 0 | 2.5E+08 | 3.2 | 116% | 86% | 39% | 63% | 0 | 1.7E+09 | 1.4E-08 | 8.3 | 0 | 2.2E+09 | 1.9E-08 | 5.1 |
| | 外部リーク | 0 | 2.5E+08 | 3.7 | 80% | 60% | 44% | 72% | 0 | 1.7E+09 | 1.4E-08 | 8.3 | 0 | 2.2E+09 | 1.9E-08 | 5.1 |
| | 内部リーク | 5 | 2.5E+08 | 2.6 | 264% | 46% | 13% | 18% | 1 | 1.7E+09 | 2.4E-08 | 20.8 | 4 | 2.2E+09 | 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カ年データ (本報告書決定結果) | | | | 平均値比 | | EF比 | | 21カ年データ報告書 | | | | 26カ年データ報告書 | | | | |
|-------------|----------------------------|--------------------|-----------------|-------------------------|------------------|-------------|-------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|---------|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| | | 観測された故障件数 [件] | 事前情報 | | EF ³⁾ | 29カ年 / 21カ年 | 29カ年 / 26カ年 | 観測された故障件数 [件] | 平均値 | EF ⁴⁾ (近接) | 観測された故障件数 [件] | 平均値 | EF ⁴⁾ (近接) | 観測された故障件数 [件] | 平均値 | EF ⁴⁾ (近接) | | |
| | | | 観測された故障件数 [1/年] | 平均値 ¹⁾ [1/年] | | | | | | | | | | | | | 平均値 ²⁾ [1/年] | 観測された故障件数 [1/年] |
| 遠がし安全弁 (DR) | 閉失敗 | 0 | 5.4E+07 | 3.9E+06 | 1.6E-07 | 2.6 | 279% | 153% | 16% | 24% | 0 | 3.8E+07 | 5.6E-08 | 15.8 | 0 | 4.8E+07 | 1.0E-07 | 10.7 |
| | 閉失敗 | 0 | 5.4E+07 | 1.2E-06 | 1.13E-08 | 3.4 | 206% | 113% | 18% | 26% | 0 | 3.8E+07 | 5.6E-08 | 15.8 | 0 | 4.8E+07 | 1.0E-07 | 10.7 |
| | 閉失敗 | 0 | 5.4E+07 | 2.4E-07 | 6.8E-08 | 2.8 | 122% | 67% | 21% | 31% | 0 | 3.8E+07 | 5.6E-08 | 15.8 | 0 | 4.8E+07 | 1.0E-07 | 10.7 |
| | 外部リーク | 0 | 5.4E+07 | 2.4E-08 | 2.2E-08 | 4.9 | 39% | 21% | 31% | 46% | 0 | 3.8E+07 | 5.6E-08 | 15.8 | 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 | 149% | 81% | 20% | 29% | 0 | 3.8E+07 | 5.6E-08 | 15.8 | 0 | 4.8E+07 | 1.0E-07 | 10.7 |
| | 作動失敗 | 0 | 5.4E+07 | 7.7E-07 | 2.9E-07 | 2.7 | 333% | 36% | 19% | 16% | 0 | 2.2E+07 | 8.1E-08 | 14.8 | 0 | 2.8E+07 | 8.1E-07 | 16.7 |
| | 真逆がし弁 (DR) | 7 | 1.8E+09 | 1.7E-06 | 1.6E-08 | 2.0 | 102% | 101% | 12% | 39% | 1 | 1.3E+09 | 1.6E-08 | 16.1 | 6 | 1.6E+09 | 1.6E-08 | 13.1 |
| | 電磁弁 | 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 | 1 | 1.6E+09 | 4.1E-09 | 6.9 |
| | 閉塞 | 0 | 1.8E+09 | 1.9E-07 | 5.1E-09 | 2.5 | 249% | 192% | 29% | 49% | 0 | 1.3E+09 | 2.1E-09 | 8.6 | 0 | 1.6E+09 | 2.7E-09 | 5.0 |
| | 外部リーク | 1 | 1.8E+09 | 3.4E-08 | 4.4E-09 | 2.6 | 109% | 123% | 22% | 43% | 1 | 1.3E+09 | 4.0E-09 | 12.0 | 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% | 39% | 1 | 1.3E+09 | 4.0E-09 | 12.0 | 1 | 1.6E+09 | 3.6E-09 | 6.1 |
| | 起動失敗 | 1 | 5.1E+07 | 9.9E-07 | 1.3E-07 | 2.7 | 116% | 110% | 16% | 31% | 1 | 3.4E+07 | 1.3E-07 | 16.5 | 1 | 4.5E+07 | 1.3E-07 | 8.7 |
| | 縦横運転失敗 | 8 | 8.8E+07 | 5.9E-06 | 3.2E-07 | 2.2 | 53% | 37% | 7% | 7% | 7 | 6.0E+07 | 6.0E-07 | 31.2 | 8 | 1.3E+08 | 8.7E-07 | 30.2 |
| | 縦横運転失敗 ^{*)} (異常時) | - | - | - | - | 30.0 | 294% | 486% | 96% | 99% | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 作動失敗 | 7 | 5.7E+08 | 8.1E-07 | 4.6E-08 | 2.3 | 433% | 27% | 17% | 10% | 1 | 3.9E+08 | 1.1E-08 | 13.3 | 6 | 5.0E+08 | 1.7E-07 | 23.6 |
| | 閉塞 | 0 | 5.7E+08 | 6.1E-07 | 1.7E-08 | 2.5 | 299% | 210% | 29% | 45% | 0 | 3.9E+08 | 5.5E-09 | 8.7 | 0 | 5.0E+08 | 7.9E-09 | 5.4 |
| | 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 | 0 | 5.0E+08 | 1.7E-08 | 7.6 |
| | 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 | 0 | 5.0E+08 | 7.9E-09 | 5.4 |
| | 内部リーク | 1 | 5.7E+08 | 1.4E-07 | 1.2E-08 | 2.8 | 209% | 147% | 32% | 51% | 0 | 3.9E+08 | 5.5E-09 | 8.7 | 0 | 5.0E+08 | 7.9E-09 | 5.4 |
| | 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 | 0 | 2.1E+08 | 2.8E-08 | 6.5 |
| タンク | 外部リーク | 0 | 2.2E+08 | 3.3E-07 | 2.8E-08 | 2.7 | 318% | 115% | 15% | 53% | 0 | 1.6E+08 | 8.9E-09 | 18.6 | 0 | 2.1E+08 | 2.4E-08 | 5.2 |
| | 伝熱管閉塞 | 3 | 2.2E+08 | 1.9E-06 | 6.9E-08 | 2.3 | 97% | 107% | 8% | 15% | 2 | 1.6E+08 | 7.1E-08 | 29.3 | 2 | 2.1E+08 | 6.5E-08 | 15.1 |
| | 破損 | 0 | 9.6E+07 | 3.3E-07 | 5.2E-08 | 3.0 | 163% | 102% | 24% | 61% | 0 | 6.5E+07 | 3.2E-08 | 12.5 | 0 | 8.5E+07 | 5.1E-08 | 4.9 |
| | 閉塞 | 1 | 8.0E+08 | 1.9E-06 | 8.4E-08 | 2.6 | 263% | 165% | 21% | 53% | 0 | 5.4E+08 | 3.2E-08 | 12.5 | 0 | 7.0E+08 | 8.8E-09 | 6.0 |
| | 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-08 | 12.5 | 0 | 7.0E+08 | 8.8E-09 | 6.0 |
| | 内部破損 | 2 | 8.0E+08 | 2.8E-07 | 1.3E-08 | 2.4 | 413% | 207% | 20% | 52% | 0 | 5.4E+08 | 3.2E-08 | 12.2 | 0 | 7.0E+08 | 6.4E-09 | 4.7 |
| | 閉塞 | 2 | 8.0E+08 | 1.0E-06 | 2.0E-08 | 2.5 | 619% | 309% | 21% | 54% | 0 | 5.4E+08 | 3.2E-08 | 12.2 | 0 | 7.0E+08 | 6.4E-09 | 4.7 |
| | 外部リーク | 1 | 2.8E+08 | 8.6E-07 | 3.8E-08 | 2.4 | 389% | 151% | 20% | 40% | 0 | 1.9E+08 | 9.9E-09 | 12.0 | 0 | 2.5E+08 | 2.5E-08 | 6.0 |
| | 内部破損 | 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 | 0 | 2.5E+08 | 1.8E-08 | 4.8 |
| | 閉塞 | 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 | 0 | 2.5E+08 | 1.8E-08 | 4.8 |
| ストレナ/フィルタ | 外部リーク | 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 | 0 | 3.2E+07 | 1.2E-07 | 7.5 |
| | 内部破損 | 1 | 3.9E+07 | 2.6E-07 | 1.3E-07 | 3.2 | 138% | 79% | 24% | 31% | 0 | 2.4E+07 | 9.5E-08 | 13.1 | 1 | 3.2E+07 | 1.7E-07 | 10.2 |
| | 閉塞 | 2 | 3.9E+07 | 2.3E-06 | 2.9E-07 | 2.5 | 104% | 80% | 13% | 19% | 2 | 2.4E+07 | 2.9E-07 | 19.5 | 2 | 3.2E+07 | 3.6E-07 | 13.1 |
| | 閉塞 | 6 | 6.5E+08 | 9.9E-08 | 3.0E-08 | 4.8 | 455% | 17% | 35% | 7% | 0 | 4.4E+08 | 6.5E-09 | 13.9 | 6 | 5.8E+08 | 1.7E-07 | 69.3 |
| | 閉塞 | 1 | 7E+08 | 9.9E-08 | 3.3E-08 | 3.1 | 204% | 18% | 19% | 9% | 0 | 1.2E+08 | 1.6E-08 | 16.3 | 0 | 1.5E+08 | 1.9E-07 | 32.5 |
| | 閉塞 | 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 | 14 | 6.0E+06 | 7.7E-06 | 4.6 |
| | 閉塞 | 0 | 1.9E+07 | 2.1E-06 | 2.8E-07 | 2.9 | 176% | 126% | 29% | 29% | 0 | 1.3E+07 | 1.6E-07 | 10.5 | 0 | 1.7E+07 | 2.2E-07 | 10.0 |
| | 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 | 3 | 2.6E+06 | 3.1E-05 | 23.6 |
| | 閉塞 | 13 | 1.0E+09 | 5.6E-06 | 3.3E-07 | 2.5 | 87% | 104% | 16% | 19% | 1 | 7.1E+08 | 3.9E-07 | 15.6 | 1 | 2.6E+07 | 3.2E-07 | 14.2 |
| | 閉塞 | 14 | 1.0E+09 | 3.3E-06 | 4.3E-08 | 2.1 | 89% | 49% | 8% | 10% | 9 | 7.1E+08 | 4.8E-08 | 25.2 | 13 | 9.2E+08 | 8.6E-08 | 20.3 |
| 蒸気発生機 | 閉塞 | 2 | 1.0E+09 | 2.1E-07 | 3.3E-08 | 2.0 | 82% | 85% | 37% | 33% | 12 | 7.1E+08 | 4.7E-09 | 5.5 | 14 | 9.2E+08 | 4.5E-08 | 6.1 |
| | 閉塞 | 6 | 9.7E+07 | 9.4E-07 | 2.1E-07 | 2.2 | 81% | 66% | 18% | 21% | 5 | 6.2E+07 | 2.6E-07 | 11.9 | 6 | 8.2E+07 | 3.0E-07 | 10.7 |
| | 閉塞 | 0 | 5.2E+07 | 5.9E-07 | 9.5E-08 | 3.0 | 195% | 148% | 30% | 30% | 0 | 3.4E+07 | 5.7E-08 | 16.0 | 2 | 4.6E+07 | 6.4E-08 | 10.0 |
| | 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 | 2 | 4.6E+07 | 3.3E-07 | 23.2 |
| | 閉塞 | 5 | 5.3E+08 | 1.4E-06 | 4.1E-08 | 2.0 | 131% | 108% | 11% | 19% | 3 | 3.8E+08 | 3.1E-08 | 17.9 | 4 | 4.7E+08 | 3.8E-08 | 11.1 |
| | 閉塞 | 2 | 2.2E+10 | 2.1E-08 | 4.4E-10 | 2.4 | 334% | 236% | 24% | 40% | 0 | 1.5E+10 | 1.3E-10 | 10.2 | 0 | 2.0E+10 | 1.9E-10 | 6.1 |
| | 閉塞 | 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 | 3 | 2.0E+10 | 6.9E-10 | 11.7 |
| | 閉塞 | 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 | 3 | 2.0E+10 | 7.3E-10 | 11.5 |

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 | | 29ヵ年 / 26ヵ年 | | 29ヵ年 / 21ヵ年 | | 21ヵ年データ報告書 | | 26ヵ年データ報告書 | | |
|-------------------------|--------------------|--------------------|---------------|----------------------------|----------------------------|------------------|------------|---------------|--------------|--------------------------|------------|---------------|--------------|--------------------------|
| | | 機番 数(件) | 延長運転 時間(h) | 平均値 ²⁾ [1/h] | 平均値 ²⁾ [1/h] | EF ³⁾ | 機番 数(件) | 延長運転 時間(h) | 平均値 [1/h] | EF ⁴⁾ (近附) | 機番 数(件) | 延長運転 時間(h) | 平均値 [1/h] | EF ⁴⁾ (近附) |
| 配置 3インチ未満 ¹⁾ | リーク | 0 | 5.4E+09 | 6.9E-10 | 3.9E-10 | 4.0 | 594 | 44% | 59% | 84% | 0 | 3.7E+09 | 6.6E-10 | 11.7 |
| | 閉塞 | 1 | 1.9E+07 | 2.5E-09 | 1.61% | 2.2 | 385 | 16% | 2.8 | 35% | 0 | 4.7E+09 | 1.6E-09 | 6.4 |
| 配置 3インチ以上 ¹⁾ | リーク | 4 | 1.2E+10 | 8.1E-10 | 2.8 | 80% | 52% | 19% | 2.8 | 27% | 2 | 8.3E+09 | 1.0E-09 | 18.5 |
| | 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 |
| リレー | 閉塞 | 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 |
| | 誤動作 | 9 | 1.3E+10 | 8.4E-07 | 3.6E-09 | 1.9 | 102% | 52% | 5% | 7% | 4 | 8.1E+09 | 3.0E-09 | 34.4 |
| 運転リレー | 不動作 | 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 |
| | 誤動作 | 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 |
| 演算器 | 不動作 | 0 | 6.3E+08 | 8.4E-07 | 1.9E-08 | 2.4 | 282% | 216% | 23% | 46% | 0 | 4.4E+08 | 5.8E-09 | 8.7 |
| | 高出力/低出力 | 8 | 3.6E+08 | 8.4E-07 | 4.9E-08 | 2.6 | 214% | 132% | 18% | 30% | 3 | 4.4E+08 | 2.1E-08 | 14.5 |
| カード (半導体ロジック回路) | 不動作 | 0 | 3.6E+08 | 8.4E-07 | 2.5E-08 | 2.6 | 383% | 84% | 10% | 12% | 0 | 2.4E+08 | 6.6E-09 | 25.7 |
| | 誤動作 | 6 | 3.6E+08 | 8.4E-07 | 5.9E-08 | 2.4 | 54% | 9% | 9% | 5% | 4 | 2.4E+08 | 9.2E-08 | 42.4 |
| 警報装置 | 不動作 | 0 | 1.9E+09 | 8.4E-08 | 4.9E-09 | 2.6 | 180% | 216% | 20% | 33% | 0 | 1.3E+09 | 2.9E-09 | 12.7 |
| | 誤動作 | 3 | 1.9E+09 | 8.4E-07 | 1.0E-08 | 2.1 | 107% | 66% | 11% | 10% | 3 | 1.3E+09 | 9.5E-09 | 19.6 |
| ヒューズ | 閉断線 | 3 | 3.9E+09 | 2.1E-06 | 6.9E-09 | 2.0 | 118% | 141% | 17% | 17% | 3 | 2.4E+09 | 5.5E-09 | 18.2 |
| | 不動作 | 7 | 8.7E+08 | 1.2E-06 | 3.1E-08 | 2.2 | 411% | 51% | 13% | 7% | 1 | 5.9E+08 | 7.6E-09 | 16.8 |
| 流量トランスミッタ | 高出力/低出力 | 21 | 8.7E+08 | 9.9E-07 | 1.3E-08 | 2.2 | 435% | 84% | 21% | 22% | 0 | 7.5E+08 | 3.9E-09 | 10.9 |
| | 高出力/低出力 | 15 | 1.1E+09 | 8.4E-07 | 4.9E-08 | 1.9 | 118% | 86% | 22% | 31% | 8 | 7.5E+08 | 2.5E-08 | 8.5 |
| 水位トランスミッタ | 不動作 | 1 | 4.5E+08 | 1.9E-06 | 2.7E-08 | 2.3 | 202% | 290% | 23% | 30% | 0 | 3.0E+08 | 1.4E-08 | 9.9 |
| | 高出力/低出力 | 2 | 4.5E+08 | 8.4E-07 | 3.0E-08 | 2.2 | 138% | 140% | 13% | 24% | 2 | 3.0E+08 | 2.2E-08 | 16.7 |
| 温度検出器 | 不動作 | 1 | 2.9E+09 | 4.1E-09 | 1.1E-09 | 2.3 | 380% | 266% | 22% | 38% | 0 | 2.0E+09 | 1.1E-09 | 10.6 |
| | 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 |
| 放射線検出器 | 不動作 | 0 | 8.3E+07 | 8.4E-07 | 7.8E-08 | 2.8 | 226% | 137% | 23% | 54% | 0 | 5.2E+07 | 3.4E-08 | 12.2 |
| | 高出力/低出力 | 4 | 8.3E+07 | 1.7E-07 | 2.6 | 239% | 78% | 12% | 30% | 1 | 5.6E+07 | 7.3E-08 | 21.8 | |
| 流量スイッチ | 不動作 | 0 | 5.3E+08 | 8.4E-07 | 1.9E-08 | 2.4 | 268% | 209% | 26% | 44% | 0 | 3.6E+08 | 7.1E-09 | 9.5 |
| | 誤動作 | 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 |
| 圧カスイッチ | 不動作 | 7 | 1.4E+09 | 8.4E-07 | 1.9E-08 | 2.5 | 93% | 61% | 6% | 8% | 6 | 9.9E+08 | 5.0E-09 | 13.9 |
| | 誤動作 | 7 | 1.4E+09 | 8.4E-07 | 2.7E-08 | 2.5 | 332% | 55% | 17% | 6% | 8 | 9.9E+08 | 2.0E-08 | 45.0 |
| 水位スイッチ | 不動作 | 7 | 1.0E+09 | 8.4E-07 | 2.7E-08 | 2.5 | 332% | 55% | 17% | 6% | 1 | 7.1E+08 | 8.2E-09 | 14.8 |
| | 誤動作 | 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 |
| 温度スイッチ | 不動作 | 0 | 4.9E+08 | 7.0E-07 | 1.9E-08 | 2.5 | 168% | 141% | 25% | 42% | 0 | 3.4E+08 | 1.1E-08 | 9.9 |
| | 誤動作 | 2 | 4.9E+08 | 8.4E-07 | 2.9E-08 | 2.4 | 111% | 113% | 6% | 18% | 2 | 3.4E+08 | 2.5E-08 | 37.9 |
| リミットスイッチ | 不動作 | 7 | 3.2E+09 | 8.4E-07 | 9.9E-09 | 2.0 | 169% | 84% | 12% | 20% | 3 | 2.2E+09 | 5.5E-09 | 16.3 |
| | 誤動作 | 2 | 3.2E+09 | 8.4E-07 | 5.0E-09 | 2.1 | 181% | 258% | 14% | 20% | 1 | 2.2E+09 | 3.1E-09 | 15.1 |
| 手動スイッチ | 不動作 | 2 | 5.1E+09 | 1.8E-07 | 2.4E-09 | 2.4 | 222% | 27% | 27% | 45% | 0 | 3.5E+09 | 1.1E-09 | 8.8 |
| | 誤動作 | 1 | 5.1E+09 | 8.4E-08 | 2.0E-08 | 2.3 | 489% | 354% | 17% | 28% | 0 | 4.3E+09 | 4.0E-09 | 13.3 |
| コントローラ | 不動作 | 1 | 6.2E+08 | 8.4E-07 | 3.1E-08 | 2.3 | 212% | 96% | 12% | 13% | 1 | 4.3E+08 | 1.4E-08 | 20.1 |
| | 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 |
| 配線/電線 | 短絡 ⁷⁾ | - | - | - | - | - | 1043% | 515% | 100% | 100% | - | - | - | - |
| | 地絡 ⁷⁾ | - | - | - | - | - | 7.4E+09 | 30.0 | 1254% | 408% | 100% | - | - | - |
| ヒューズ | 閉断線 ⁷⁾ | - | - | - | - | - | 7.4E+09 | 30.0 | 346% | 408% | 100% | - | - | - |
| | 断線 ⁷⁾ | - | - | - | - | - | 5.0E+08 | 30.0 | 383% | 424% | 100% | - | - | - |
| アナウンサー | 機能喪失 ⁷⁾ | - | - | - | - | - | 958% | 562% | 100% | 100% | - | - | - | - |

注釈*1. ハイパー事前分布のパラメータの中央値の算出に利用した。
 *2. 事後分布を対数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、5%ile値を用いて評価した (EF(近附) = 95%ile値 / 5%ile値)。
 *5. 特殊な故障率としてベイズ手法によるファイル評価を実施した。
 *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. 80%の改良型制御機器の故障率を含む。
 *10. ADBを戴いた従来の50%。
 *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、材質変更面許や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。