

2019年12月25日  
関西電力株式会社

高エネルギーアーク損傷（HEAF）発生時の圧力上昇に対する  
考察について

1. はじめに

第3回新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合（2018年10月15日開催）「資料3-2高エネルギーアーク損傷（HEAF）に伴う火災対策に係る事業者の取り組み状況について」5頁に試験体選定時の考え方を記載しており、HEAF発生時の圧力上昇は、盤の変形や開口部から圧力が抜けるため盤内温度上昇に盤内容積の大小は直接寄与しない旨説明している。事業者意見の聴取に係る会合では、試験時に確認された電気盤の内圧は外部電源受電時のM/Cを代表として記載しているが、HEAF発生直後の最大圧力値は約**62.5kPa**（火災が発生しない最大アークエネルギー）であった。それに比べて、非常用ディーゼル発電機給電時は約**2.98kPa**（火災が発生しない最大アークエネルギー）であった。（添付1参照）

本資料は、外部電源受電時と同様にアーク火災を防止するためにはアーク火災となるアークエネルギー（しきい値）以内に抑える設計とすることについて、前述の外部電源受電時、非常用ディーゼル発電機給電時のHEAF発生直後の最大圧力の違いを踏まえてもメカニズムとして同等であることについて考察し補足説明するものである。

2. 外部電源受電時と非常用ディーゼル発電機給電時におけるHEAF発生時の最大圧力の違いについて（考察）

電気盤のHEAF試験における電気盤内の圧力上昇測定は、M/C（D/G）のHEAF試験、M/C（D/G）以外のHEAF試験において全て同じ圧力センサ（共和電業製・ひずみゲージ式・200kPa）で測定した。なお、測定データには、アーク発生時の電氣的なノイズが重畳するため、ローパスフィルター（試験周波数50Hzの10倍程度を目安）で処理した。

M/C（D/G）のHEAF試験における電気盤内の圧力は、M/C（D/G）以外のHEAF試験と同様に通電開始から0.02秒以内に最大値に達し、直後に圧力が抜けゼロ付近の値を推移している。

試験で得られた圧力の最大値については、次のように考察できる。開放系アーク放電に関するBabrauskas博士の論文<sup>4</sup>によると図1のとおりアークパワー（横軸）は、発生圧力×離隔距離（アーク発生箇所と圧力測定箇所との間の距離）の積（縦軸）で整理できる。今回の電気盤寸法は、高さ2.3m×幅1m×奥行き2.5mであり、電気盤の正面で測定した圧力が最大値を示したため離隔距離を0.5mとした。試験時の条件を下表に整理し図1

黄色プロットで示すと概ね **Baker's theory** と示された赤線付近にあることから開放系の論文データと符合する。これより、アーク発生時の電気盤内圧力は、開放系のアークパワーと離隔距離の物理指標で整理できる。

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

表1 アーク発生時の電気盤内圧力に関連する物理量

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

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

$V$  : アーク電圧、 $I$  : 試験電流

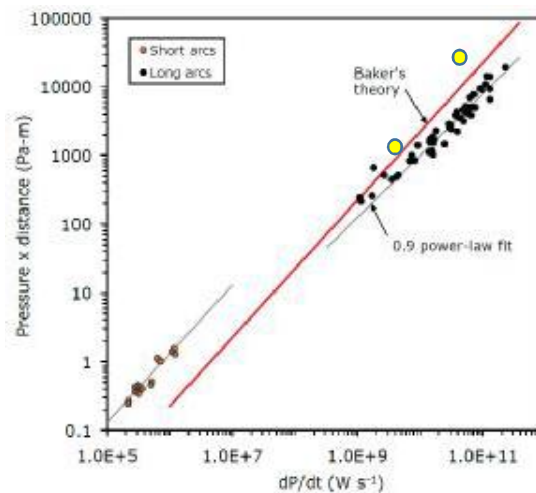


Figure 5 The results of Drouet and Nadeau for short (8 mm) and long (many meters) arcs

図1 開放空間におけるアークパワーと圧力上昇の関係

出典 [1] V. Babrauskas, "Electric Arc Explosions", Proc. 12th Intl. Conf. Interflam, pp. 1283-1296, 2010

次に、図 2 に HEAF 試験で得られた全ての M/C の最大アークパワーと圧力上昇最大値の関係を示す。図 1 と同様に概ね比例関係にあることから電気盤内の圧力上昇の現象としては、M/C (D/G) の HEAF 試験および M/C (D/G) 以外の HEAF 試験は同様であると考えられる。

なお、M/C (D/G) の HEAF 試験における、最大アークパワーは 14.4~17.2MW であり、M/C (D/G) 以外の M/C の HEAF 試験時における値（非耐震：33.6~68.3MW, 耐震：84.9~156.9MW）と比べて小さい理由は、試験条件における電流値が小さいからである（M/C (D/G) 5kA、M/C (D/G) 以外の非耐震：18.9kA,耐震：40kA）。

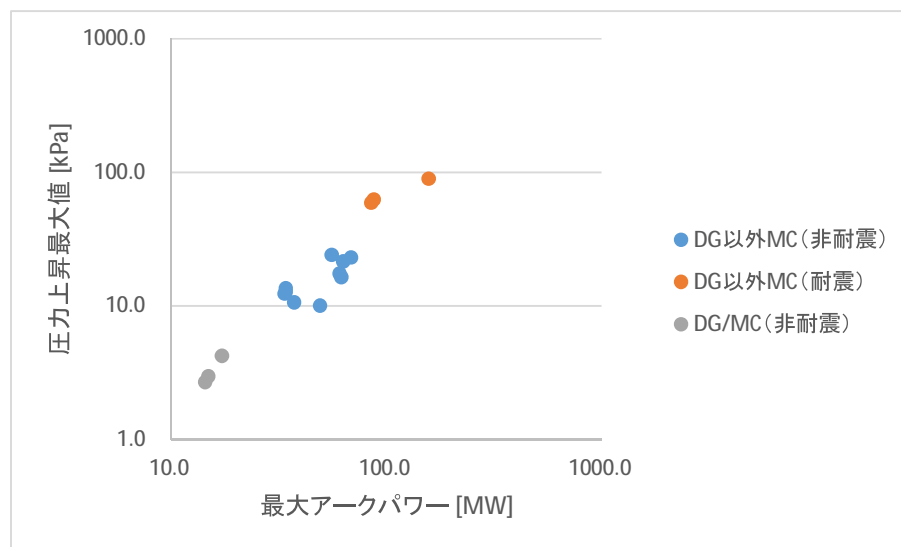


図 2 最大アークパワーと圧力上昇最大値の関係

### 3. まとめ

今回の HEAF 試験では、図 2 のとおりアークパワーと圧力上昇値は比例関係にあることから、開放系アーク放電に関する Babrauskas 博士の論文<sup>4)</sup>より、HEAF 発生直後の圧力上昇という現象は、外部電源受電時と非常用ディーゼル発電機給電時に違いはなく開放系の電気盤として同等のメカニズムを有するものとして考えることができる。

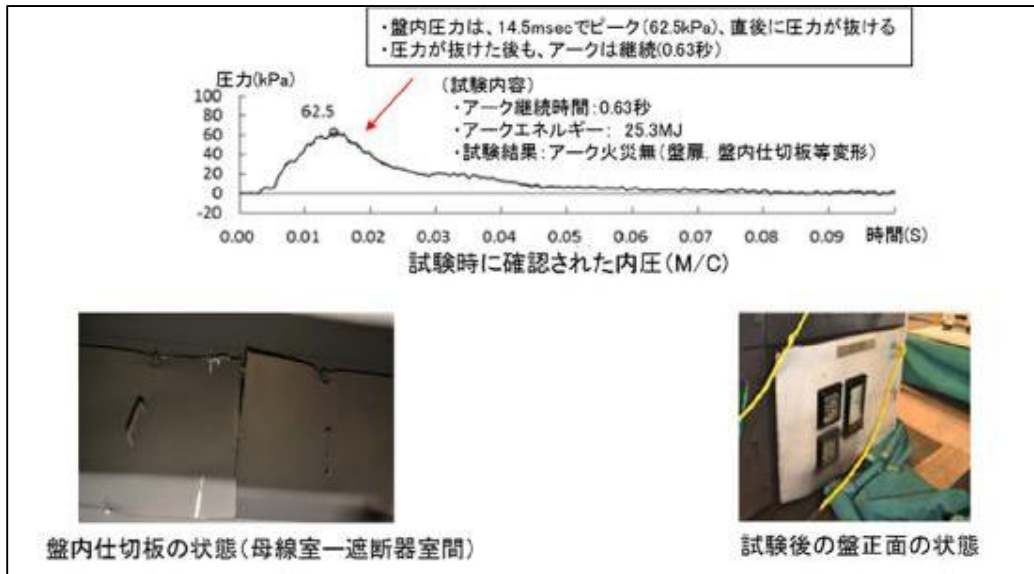
よって、アーク火災発生メカニズムである以下の①、②について、非常用ディーゼル発電機給電時においても①については本考察のとおり外部電源受電時と同等のメカニズムであると考えられる。

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

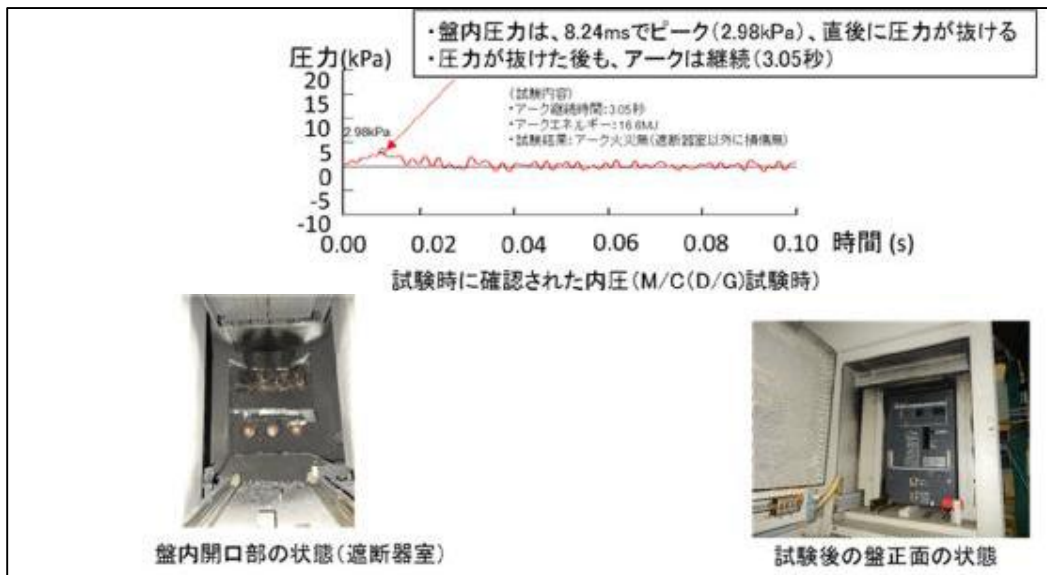
また、②については第 3 回新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合（2018 年 10 月 15 日開催）「資料 3-2 高エネルギーアーク損傷（HEAF）に伴う火災対策に係る事業者の取り組み状況について」補 10 頁に記載のとおり M/C についてはアークエネルギーが約 25MJ 以上となれば火災となり、アーク継続時間とアークエネルギーは基準電流 25kA で換算すると外部電源受電時、非常用ディーゼル発電機給電時に違いはなく概ね比例関係にあることから同等のメカニズムと考えることができる。

以 上

(1) 外部電源受電時の電気盤内圧



(2) 非常用ディーゼル発電機給電時の電気盤内圧



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

### I-3. 試験条件(1/2)

(原・写真 出典(2))

5

・試験方法は、「高エネルギーアーク損傷(HEAF)に係る電気盤の設計に関する審査ガイド」(以下、「審査ガイド」)を参照し、試験内容の妥当性を確認。(試験用電源盤の代表性、試験条件、アーク火災判定方法等)

・主な試験条件を以下に示す。【審査ガイドの各項目適合状況「Ⅲ 補足資料」参照】

(1) 試験体の選定

同種類の電源盤単位(M/C・P/C・C/C毎)の場合は同等と扱い試験を実施

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

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

・盤内圧力は、14.5mssecでピーク(92.3MPa)、直後に圧力が抜ける  
・圧力が抜けた後も、アークは継続(0.63秒)

試験時に確認された内圧 (M/C/D/G以外)

盤内仕切板の状態(毎線室—遮断器室間)      試験後の盤正面の状態

### 補足1. 試験条件設定の考え方詳細

#### (3) 短絡電流の目標値(5/5)

補 10

○保護継電器の整定

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

試験電圧 6.9kV  
凡例:  
● 黒塗 HEAF火災有  
○ 白塗 HEAF火災無  
○ 非耐震MC (DG以外)  
◇ 耐震MC (DG以外)  
△ 非耐震MC (DG)

補正した過電時間tarcで整理  
tarc = tarc(実測値) × 電流平均値(実測値) / 基準電流20kA

アーク継続時間—アークエネルギーの関係(基準電流20kA補正)