

# NRA 技術報告

NRA Technical Report Series

## 原子力発電所における高エネルギー アーク損傷（HEAF）に関する分析

Analysis of High Energy Arcing Fault at Nuclear Power  
Plants

梶島 一、土野 進

Hajime KABASHIMA and Susumu TSUCHINO  
安全技術管理官(システム安全担当)付  
Division of Research for Reactor System Safety

原子力規制庁  
長官官房技術基盤グループ  
Regulatory Standard and Research Department,  
Secretariat of Nuclear Regulation Authority(S/NRA/R)

## 原子力規制委員会

Nuclear Regulation Authority

平成 28 年 3 月

March 2016

本技術報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究の成果をまとめたものです。原子力規制委員会は、これらの成果が広く利用されることを期待し適時に公表することとしています。

なお、本技術報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、改めて原子力規制委員会としての判断が行われます。

本レポートの内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 安全技術管理官（システム安全担当）付

〒106-8450 東京都港区六本木1-9-9六本木ファーストビル

電話 : 03-5114-2223

ファックス : 03-5114-2233

# 原子力発電所における高エネルギーアーク損傷 (HEAF) に関する分析

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ

安全技術管理官 (システム安全担当) 付

椛島 一、土野 進

## 要 旨

2011年3月の東北地方太平洋沖地震により東北電力株式会社女川原子力発電所1号機(以下「女川1号機」という。)の高圧電源盤(6900V)において、高エネルギーアーク損傷(HEAF: High Energy Arcing Fault。以下「HEAF」という。)が発生し、同電源盤に連結された他の電源盤に損傷が広がり、また、その後に火災が発生し、原子力発電所の安全機能に影響を与えた。このHEAF事象は、その影響は異なるものの、国内外の原子力発電所の電気設備で発生しており、原子力安全規制の観点からHEAF事象が安全機能に及ぼす影響を評価する必要がある。

原子力規制庁長官官房技術基盤グループでは、HEAF事象の進展及びその影響を把握するために女川1号機の高圧電源盤を模擬した試験装置を用いて、大電流のアーク放電を発生させる試験(以下「HEAF試験」という。)を実施した。また、原子力発電所で使用されている主要な電気盤についてのHEAF事象の特性を把握するため、低圧(480V)の配電盤及びモータコントロールセンタを用いて、HEAF試験を実施した。

これらHEAF試験の結果、高圧電源盤及び配電盤を用いた試験では、HEAFに起因する火災発生を目安となるアークエネルギーのデータを得るとともに、主要な電気盤で生じるHEAFに係るアーク放電の特性等についてのデータを得た。

本技術報告では、HEAF試験の結果から得られたアークの放電特性、アーク放電による火災の発生、HEAF事象の熱的影響範囲に関する知見をまとめるとともに、HEAF試験に用いた異なる電気盤に対して、アークパワーが一定になることについての考察を取りまとめている。

Analysis of High Energy Arcing Fault at Nuclear Power Plants

Hajime KABASHIMA and Susumu TSUCHINO  
Division of Research for Reactor System Safety  
Regulatory Standard and Research Department,  
Secretariat of Nuclear Regulation Authority(S/NRA/R)

Abstract

A high energy arcing fault (HEAF) event occurred in the high-voltage (6900V) metalclad switchgears at unit 1 of Onagawa Nuclear Power Station (NPS) of the Tohoku Electric Power Company Co., Inc. on March 11, 2011 due to the Tohoku-District Off the Pacific Ocean Earthquake. Not only the affected metalclad switchgear but also those connected to it were damaged due to the arc energy and it also caused a fire that influenced the safety function of the unit. Similar HEAF events, although their impacts are different from each other, have occurred in the electrical equipment and components in the nuclear power plants (NPPs) worldwide. Therefore, from the safety regulation point of view, it is necessary to evaluate the influences of HEAF events on the safety functions of NPPs.

In order to investigate the HEAF event progression and well understand the phenomena involved, Regulatory Standard and Research Department in Secretariat of the Nuclear Regulation Authority conducted a series of experiments (HEAF tests) where high-energy electric arcs were generated at the facility simulating the design and operating conditions of the high-voltage metalclad switchgears at unit 1 of Onagawa NPS. In addition to this, to obtain the HEAF characteristics of the major electric cabinets used in NPPs, the HEAF tests were also done for other types of electric cabinets, such as low-voltage (480V) distribution panel and motor control center.

As a result of the tests, data have been obtained on the threshold values of the arc energy above which an ensuing fire takes place for metalclad switchgears

and distribution panel, and on the characteristics of high energy arcs occurring in the major electric cabinets.

This report summarizes the information on the arc energy characteristics, arc energy values above which an ensuing fire takes place, and the zone of thermal influence due to HEAF events obtained from the HEAF tests, and discusses the reason of the constant arc power for three different electric cabinets.

# 原子力発電所における高エネルギーアーク損傷 (HEAF) に関する分析

## 目 次

1. まえがき	1
2. 原子力発電所における HEAF 事例	3
2. 1 HEAF 事象の概略	3
2. 2 女川 1 号機での HEAF 事例	3
2. 3 HEAF 事象の重要性	5
3. HEAF 試験概要	6
3. 1 HEAF 試験の目的	6
3. 2 試験体の選定	6
3. 3 短絡電流の目標値	7
3. 4 試験に用いた電気回路	8
3. 5 計測項目	9
3. 6 HEAF 試験に用いた電気盤	10
3. 6. 1 高圧電源盤の構造及びアーク放電の発生位置	10
3. 6. 2 配電盤の構造及びアーク放電の発生位置	11
3. 6. 3 モータコントロールセンタの構造及びアーク放電の発生位置	12
3. 7 アーク放電の継続時間の目標値	13
3. 8 アーク放電のエネルギーの計算	13
3. 9 火災の定義	13
4. HEAF 試験結果	14
4. 1 高圧電源盤	14
4. 2 配電盤	16

4. 3	モータコントロールセンタ	18
4. 4	HEAF 試験後の電気盤の変形等	20
4. 5	女川 1 号機と本 HEAF 試験結果における高圧電源盤の損傷状況の比較	21
5.	HEAF 試験で発生したアーク放電の特性	22
5. 1	HEAF 試験における電圧、電流及びアークパワー	22
5. 1. 1	高圧電源盤	22
5. 1. 2	配電盤	23
5. 1. 3	モータコントロールセンタ	24
5. 2	アークエネルギーとアーク放電の継続時間との関係	25
5. 3	HEAF 試験のアークパワーに関する考察	27
5. 3. 1	アーク放電のエネルギーモデル	27
5. 3. 2	アーク放電に係る公開データ	27
5. 3. 3	アークパワーが一定になる理由について	28
5. 3. 4	高圧電源盤でアークパワーがやや大きくなった理由について	29
6.	アーク放電による火災の発生	31
6. 1	火災の発生とアークエネルギーの関係	31
6. 2	火災発生評価や抑制に関する考え方	32
7.	HEAF 事象の影響範囲	33
7. 1	熱流束の測定ポイントの設定	33
7. 2	熱流束の測定	33
7. 3	熱流束の測定結果	34
7. 4	熱流束に関する考察	35
8.	まとめ	37
	参考文献一覧	38

付録 1. 高圧電源盤におけるスラグカロリメータの測定位置 .....	40
付録 2. 配電盤におけるスラグカロリメータの測定位置 .....	41
付録 3. モータコントロールセンタにおけるスラグカロリメータの測定位置 ..	42
付録 4. HEAF 試験後の高圧電源盤 (試験 2) .....	43
付録 5. HEAF 試験後の配電盤 (試験 1) .....	44
付録 6. HEAF 試験後のモータコントロールセンタ (試験 2) .....	45

## 表一覧

表 3. 1	HEAF 試験における電流・電圧値	8
表 3. 2	HEAF 試験の計測項目一覧	9
表 4. 1	高圧電源盤の HEAF 試験結果	15
表 4. 2	配電盤の HEAF 試験結果	17
表 4. 3	モータコントロールセンタの HEAF 試験結果	19
表 4. 4	試験後の外観及び電気盤の特徴	20
表 5. 1	各電気盤における HEAF 試験結果	25
表 5. 2	アーク放電に係る公開データの一覧	27
表 7. 1	各電気盤における熱流束の測定結果	34
表 7. 2	ケーブルの損傷基準（発火と損傷判断のための判定基準）	35
表 7. 3	熱可塑性ケーブルの損傷発生時間と熱流束との関係	36

## 図一覧

図 2. 1	女川 1 号機の高圧電源盤の HEAF による損傷状況	4
図 2. 2	女川 1 号機の高圧電源盤におけるアーク放電発生原因の推定図	4
図 3. 1	原子力発電所の所内電気系統及び電気設備	6
図 3. 2	DP と MCC (+モータ) の接続系統図	8
図 3. 3	HEAF 試験に用いた回路	8
図 3. 4	試験に用いた高圧電源盤	10
図 3. 5	試験に用いた配電盤	11
図 3. 6	試験に用いたモータコントロールセンタ	12
図 4. 1	高圧電源盤の HEAF 試験	14
図 4. 2	配電盤の HEAF 試験	16
図 4. 3	モータコントロールセンタの HEAF 試験	18
図 5. 1	高圧電源盤の HEAF 試験の波形 (電圧、電流及びアークパワー)	22
図 5. 2	配電盤の HEAF 試験の波形 (電圧、電流及びアークパワー)	23
図 5. 3	モータコントロールセンタの HEAF 試験の波形 (電圧、電流及びアークパワー)	24
図 5. 4	アーク放電の継続時間とアークエネルギーの関係性	26
図 5. 5	アーク放電のエネルギーモデル	27
図 6. 1	火災の発生に必要なアークエネルギー	31
図 7. 1	HEAF 以外の火災に対する電気盤の ZOI	33
図 7. 2	熱流束の測定	34

## 略語表

DP	: Distribution Panel	配電盤：パワーセンタ（PC）という 場合もある
HEAF	: High Energy Arcing Fault	高エネルギーアーク損傷
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers	米国電気電子学会
FIRE	: Fire Incident Records Exchange Project	OECD/NEA の火災事象情報交換 プロジェクト
MCC	: Motor Control Center	モータコントロールセンタ
M/C	: Metalclad Switchgear	高圧電源盤：米国では単に Switchgear という場合もある
NRC	: Nuclear Regulatory Commission	米国原子力規制委員会
OECD/NEA	: Organization for Economic Co-operation and Development /Nuclear Energy Agency	経済協力開発機構/原子力機関
S/NRA/R	: Regulatory Standard and Research Department, Secretariat of Nuclear Regulation Authority	原子力規制庁長官官房技術基盤 グループ
ZOI	: Zone of Influence	影響範囲

## 1. まえがき

近年、高エネルギーアーク損傷（HEAF：High Energy Arcing Fault。以下「HEAF」という。）と呼ばれる大規模放電が、国内外の原子力発電所の電気設備で発生している。電気設備で HEAF が発生した場合には、その内部及び周辺の圧力・温度が急激に上昇することによって破壊作用を伴う爆発現象が生じ、深刻な機器破損を引き起こすとともに、HEAF に起因する火災が発生することにより、設備周辺のケーブル等に大きな影響を及ぼす事例もある。

これらの状況を踏まえ、米国原子力規制委員会（以下「米国 NRC」という。）では、2000 年代初頭から自国で発生した HEAF 事象の事例分析<sup>(参1)</sup>に取り組んでいる。また、経済協力開発機構/原子力機関（以下「OECD/NEA」という。）の原子力施設安全委員会（CSNI）では、2009 年に HEAF 事象に係るワーキンググループを設置するとともに、HEAF 事象を原子力施設の安全確保のために考慮することの重要性を提唱している。HEAF 事象は、原子力安全規制の観点でその影響評価手法の整備が必要であることから、国際的にも注目されている。我が国においても、2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震により、東北電力株式会社女川原子力発電所 1 号機（以下「女川 1 号機」という。）の高圧電源盤において、HEAF に起因すると考えられる爆発的な現象が生じるとともに、火災が発生した。この HEAF に起因する火災の影響により、隣接する電源盤が延焼するとともに、多くの電気設備やケーブルが焼損を受けた。

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（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号）第 8 条では、火災の発生防止、火災の検知及び消火並びに火災の影響の軽減の 3 方策を講じることを求めている。HEAF に関しては、「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド<sup>(参2)</sup>」において、米国の火災評価ガイド（NUREG/CR-6850）<sup>(参3)</sup>を参考に、火災源の一つとして記載されている。そのため、原子力規制庁長官官房技術基盤グループ（以下「S/NRA/R」という。）は、原子力施設における火災防護に係る規制基準の高度化に関する研究として、2013 年から 2015 年にかけて女川 1 号機の高圧電源盤で発生したような HEAF 事象についてのメカニズムや事象の進展等に関する知見を取得する目的で各種電気盤の HEAF 試験を実施してきた。HEAF 試験として、原子力施設で一般的に使用されている高圧電源盤（7000V 前後）、比較的低電圧（480V）の配電盤及びモータコントロールセンタを対象に、実機で想定される大電流のアーク放電を発生させた。

本技術報告では、これまでに実施した HEAF 試験の内容及び結果をまとめるとともに、HEAF の事象進展、アーク放電のエネルギーレベルと火災発生条件に係る知見を整理した。また、HEAF 試験に用いた異なる電気盤に対して、アークパワーが一定となることについて考察を取りまとめた。

なお、本技術報告に記載した成果の一部については、既に日本原子力学会「2013 年秋の大会<sup>(参4)</sup>」及び「2014 年春の年会<sup>(参5)</sup>」及び旧独立行政法人原子力安全基盤機構

(JNES) 安全研究年報 (平成 24 年度)<sup>(参6)</sup> において公表している。

## 2. 原子力発電所における HEAF 事例

本章では、HEAF 事象の概略についてまとめるとともに、最近の HEAF 事象として、2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震により発生した女川 1 号機における HEAF 事例<sup>(参7)</sup>を示す。

### 2. 1 HEAF 事象の概略

HEAF 事象とは、電気設備の故障（地震等による接続不良、環境条件及び導電性異物（保全作業中に使用された金属レンチ、ドライバー等）の混入による短絡等）に起因して発生するアーク放電に伴う爆発的なエネルギー放出により、アーク放電発生箇所の圧力・温度が急激に上昇し、深刻な機器損傷を引き起こす事象である。また、爆発的なエネルギー放出により機器の破壊・変形、扉の開放、給電機器のトリップ等が起こることに加え、アーク放電に起因する火災の発生により周辺のケーブル等に影響を及ぼす場合がある。

HEAF 事象は国内外の原子力発電所で発生している。OECD/NEA 火災事象情報交換（FIRE : Fire Incident Records Exchange）プロジェクトの報告書<sup>(参8)</sup>によれば、1975 年から 2012 年までに原子力発電所で発生した火災 415 件中 48 件（11.5%）が HEAF 事象に起因するものであったとしている。HEAF は、地震による電気設備の接続部の破損、電気設備の経年劣化及び保守・メンテナンス作業に係るヒューマンエラーの増大の結果、年々増加する傾向にあるとされている。

### 2. 2 女川 1 号機での HEAF 事例

2011 年 3 月の女川 1 号機におけるタービン建屋地下 1 階の常用高圧電源盤の損傷状況及びアーク放電の発生原因の推定図を図 2. 1 及び図 2. 2 に示す。

女川 1 号機では、常用設備 6-1A ユニットにおいて、異なる 2 台の高圧電源盤でアーク放電が発生し、連結する 10 台の高圧電源盤にケーブルダクトを通じて損傷が広がった。この損傷及びその後の火災によって安全系の残留熱除去系ポンプが一時停止するという二次的な事象も発生した<sup>(参9)</sup>。

東北電力は、この女川 1 号機の HEAF 事例におけるアーク放電の発生原因について以下のように推定している。

- ① 地震の大きな振動によって、耐震架台が設置されていない当該盤のマグネブラス トしゃ断器（MBB）は固定されず、下部にスペースがあることから大きく揺れ、一次、二次側断路部の接続導体及び絶縁物の変形・破損した。
- ② 断路部の変形・破損により接続導体が周囲の構造物（バリアなど）と接触し、短絡・地絡が発生した。
- ③ 一部短絡により接続導体と周囲の構造物でアーク放電が発生した。
- ④ アーク放電の発生熱の影響により、盤内ケーブルの絶縁被覆は溶けて発煙し、遮断器を含む周辺構造物が焼損した。



図2. 1 女川1号機の高圧電源盤のHEAFによる損傷状況<sup>(参7)</sup>  
 Fig. 2.1 Damage of metalclad switchgear caused by HEAF event at Onagawa NPS unit 1

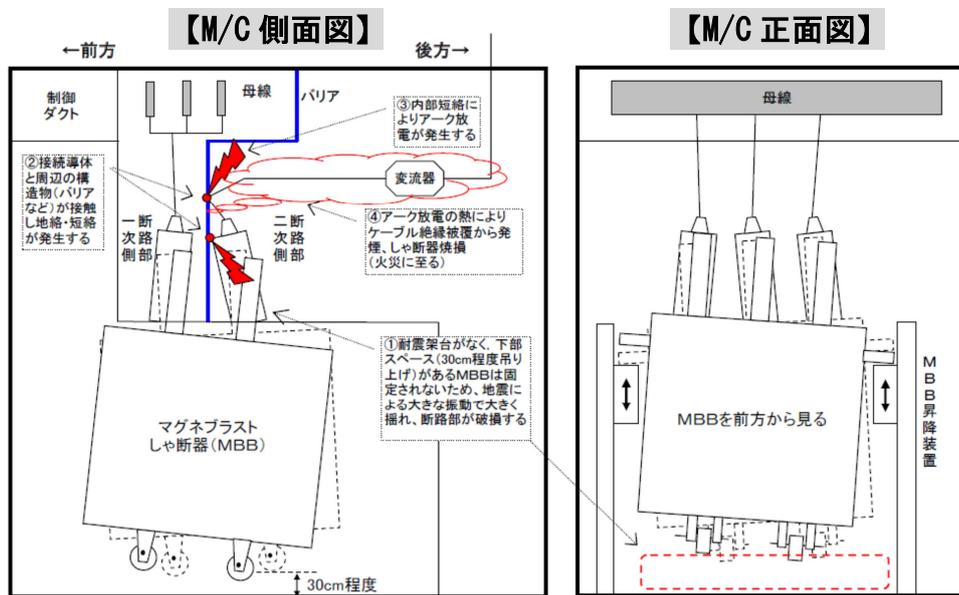


図2. 2 女川1号機の高圧電源盤におけるアーク放電の発生原因の推定図<sup>(参7)</sup>  
 Fig. 2.2 Presumed cause of arc outbreak in metalclad switchgear of Onagawa NPS unit 1

### 2. 3 HEAF 事象の重要性

以上のような HEAF 事象は国内外の原子力発電所の電気設備で発生しており、電気設備内外のケーブルや機器等に重大な損傷をもたらす。また、HEAF に起因する火災の発生により、故障部位の近くのケーブル及び機器が焼損する場合がある。一方、前述のように、現行の原子力発電所の内部火災影響評価ガイド<sup>(参 2)</sup>において、考慮すべき火災源の一つとして HEAF が挙げられているものの、その評価手法は規定されておらず、その手法を整備する必要がある。したがって、HEAF の事象進展、火災が発生するアークエネルギーのレベル、アーク放電の影響範囲等に係る技術的知見を得ることは、火災防護に係る規制基準の高度化を図っていく上で重要である。

### 3. HEAF 試験の概要

#### 3. 1 HEAF 試験の目的

本 HEAF 試験の目的は、HEAF の事象進展、HEAF により火災が発生するアークエネルギーのレベル、アーク放電の影響範囲等に係る技術的知見を得ることである。この目的のため、S/NRA/R は 2013 年から大電流対応の発電機を有する米国 KEMA 研究所にて HEAF 試験を実施している。なお、本 HEAF 試験における計測等については、研究協力協定に基づき米国 NRC からの協力を得ている。

#### 3. 2 試験体の選定

一般的な原子力発電所の所内電気系統及び電気設備を図 3. 1 に示す。原子炉運転中は、主発電機からの電力の一部は、変圧器によって降圧し、モータ等のための所内電源として用いられている。所内電源は、高圧電源盤（7000V 前後）、配電盤（480V）及びモータコントロールセンタ（480V）を介して供給されている。今回の試験体としては、原子力発電所の代表的な電気設備である高圧電源盤、比較的低電圧の配電盤及びモータコントロールセンタを用いた。

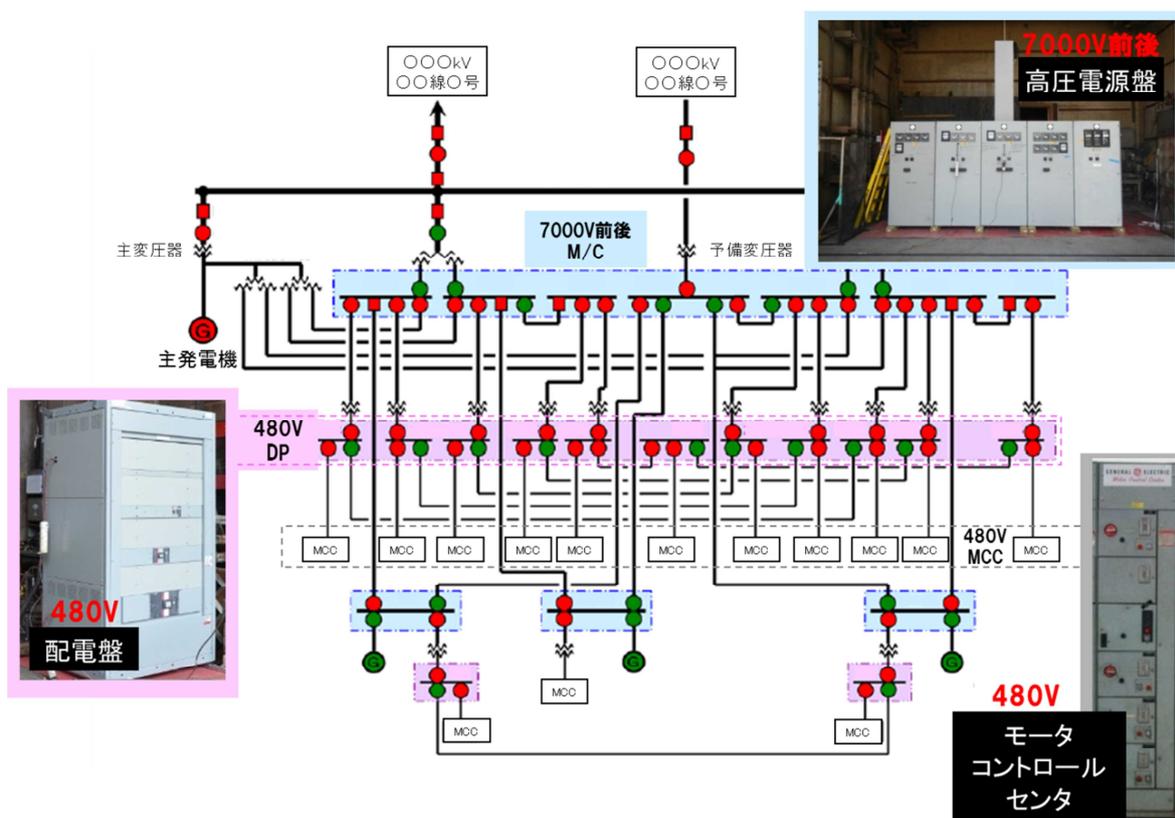


図 3. 1 原子力発電所の所内電気系統及び電気設備

Fig. 3.1 Typical electrical system and equipment in nuclear power plant

### 3. 3 短絡電流の目標値

HEAF 試験時に電気盤（高圧電源盤、配電盤及びモータコントロールセンタ）にアーク放電を発生させる電流の目標値として、短絡電流を設定する必要がある。各電気盤の短絡電流値は原子力発電所の電気系統の設計時に設定されるものであり、電気盤の上流側の変圧器のインピーダンスと変圧器の二次側定格電流によって算出される。以下に、短絡電流値の算出方法を記す。

まず、変圧器二次側の定格電流  $I_0$  は、三相電力  $W$  及び定格電圧  $V_0$  から以下の式で求まる。

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

また、計算上最大の三相の短絡電流  $I_b$  は、短絡インピーダンス（又は変圧器の銘板パーセントインピーダンス） $Z$  及び定格電流  $I_0$  を使用して以下のように求められる。

$$I_b = I_0 \times 100 / Z \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 3. 2})$$

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

高圧電源盤 (M/C) については、三相電力  $W$  が 26000kVA、定格電圧が 7100V である。また、高圧電源盤の上流に存在する変圧器の  $Z$  は、9.5%であることから、式 (3. 1) 及び (3. 2) より、短絡電流  $I_{b\_M/C}$  は、以下のように求められる。

$$I_{0\_M/C} = 26000 / (\sqrt{3} \times 7.1) = 2.1 \text{ kA}$$

$$I_{b\_M/C} = 2.1 \text{ kA} \times 100/0.095 = 22.3 \text{ kA}$$

標準的な電気設備における比較的低電圧の配電盤 (DP) 及びモータコントロールセンタ (MCC) の接続関係及び諸量を図 3. 2 に示す。配電盤 (DP) の短絡電流  $I_{b\_DP}$  は、図 3. 2 の標準設計条件から高圧電源盤と同様に計算すると、以下のとおりとなる。

$$I_{b\_DP} = 52.3 \text{ kA}$$

また、モータコントロールセンタで短絡が発生した場合には、配電盤との接続関係及びモータコントロールセンタに接続するモータからの寄与電流 (モーターコントリビューション) による短絡電流の増分を考慮した。すなわち、この短絡電流の増分として、モータが 4 台接続されていると仮定し、モータの定格電流 2.8 kA の 4 倍の電流が短絡時に流れる最大値であるとみなして、次式によりモータコントロールセンタの短絡電流  $I_{b\_MCC}$  を求めた。

$$I_{b\_MCC} = 52.3 + 4 \times 2.8 = 63.5 \text{ kA}$$

以上、各電気盤における短絡電流値の目標値を表3. 1に示す。

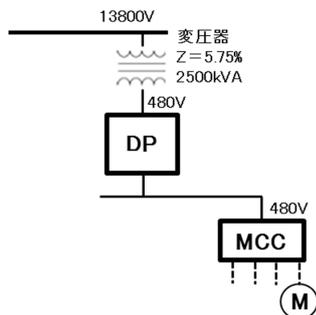


図3. 2 DP と MCC (+モータ) の接続系統図

Fig.3.2 Distribution diagram between DP and MCC (+Motor)

表3. 1 HEAF 試験における電流・電圧値

Table 3.1 Target value of voltage and ampere on HEAF test

電気盤	電力W (kVA)	定格電圧値 $V_0$ (V)	短絡インピーダンス Z (%) (変圧器の銘板パーセントインピーダンス)	短絡電流目標値 $I_b$ (kA)
高圧電源盤 M/C	26000	7100	9.5	22.3
配電盤 DP	2500	480	5.75	52.3
モータコントロールセンタ MCC	2500	480	5.75	63.5

### 3. 4 試験に用いた電気回路

実機で発生するアーク放電を模擬するために用いた回路を図3. 3に示す。

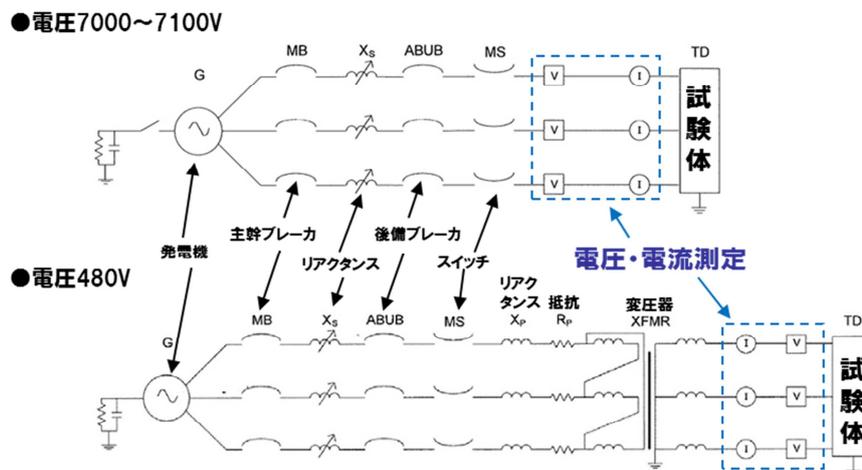


図3. 3 HEAF 試験に用いた回路

Fig. 3.3 HEAF test circuit

電圧が 7000～7100V の場合と 480V の場合で構成の異なる回路を用いた。図中の試験体の部分に、対応する電気盤を設置して、試験を実施した。また、試験時の電圧及び電流値は電気盤よりも上流（発電機側）で測定した。

なお、本 HEAF 試験におけるアーク放電の発生方法は、米国電気電子学会（IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers。以下「IEEE」という。）C37. 20. 7-2007<sup>(参 10)</sup>に基づいており、図 3. 4 に示すように母線に導電性針金をワイヤリングした状態で、3. 3 で求めた大電流の短絡電流目標値を流すことによりアークを発生させた。

### 3. 5 計測項目

HEAF 事象とその影響を評価するために必要と考えられる項目は、アークパワー及びアークエネルギーを知るためのアーク放電の電圧電流波形、電気盤内部への影響に関する知見を得るためのアーク放電時の電気盤内圧力、並びに電気盤周囲への影響に関する知見を得るための電気盤周囲の熱流束である。

HEAF 試験における計測項目を表 3. 2 に示す。アーク放電のパワー及びエネルギー量は、電圧、電流及びアーク放電の継続時間の実測値より計算した。電気盤内部の圧力は、圧電空気圧トランスデューサで測定した。また、電気盤周囲における熱流束の測定は、スラグカロリメータを用いた。

表 3. 2 において熱流束測定位置の設定根拠として参照している NUREG/CR-6850 では、米国の原子力発電所における火災事象の経験に基づいて影響範囲（ZOI: Zone of Influence。以下「ZOI」という。）を設定しており、本 HEAF 試験においてもそれを参考に測定位置を決めている。なお、スラグカロリメータの取付け位置については付録 1 から 3 に示す。

表 3. 2 HEAF 試験の計測項目一覧

Table 3.2 Measuring items of HEAF tests

計測項目	計測目的	方法
1. 電圧電流波形	アークパワー及びアークエネルギーを計算する。	電圧及び電流の波形を記録し分析する。
2. 電気盤内圧力	電気盤内部への影響に関する知見を得る。	圧電空気圧トランスデューサを用いて電気盤内の圧力を測定する。
3. 電気盤周囲の熱流束	電気盤内で発生したアーク放電の盤外への影響に関する知見を得る。	スラグカロリメータをNUREG/CR-6850 <sup>(参 3)</sup> で規定されるZOI(図7. 1参照)の境界線上に設置して熱流束を測定する。

### 3. 6 HEAF 試験に用いた電気盤

#### 3. 6. 1 高圧電源盤の構造及びアーク放電の発生位置

高圧電源盤としては、General Electric 社製マグネブラスト遮断器を搭載した電源盤であり、女川1号機のものとはほぼ同型になるように盤内の構造等を小改造したものをを用いた。女川1号機において HEAF が発生した高圧電源盤は10連であったが、試験施設には配列における長さ方向に制限があるため、その上限である5連の高圧電源盤を用いた。

高圧電源盤（縦：2,133mm、横：914mm、高さ：2,286mm）の構造及びアーク放電の発生位置を図3.4に示す。本高圧電源盤の定格値は電圧6900V及び電流2.3kAであるが、今回は定格値が電圧7000～7100V及び電流2.3kAのものとして HEAF 試験を行った。高圧電源盤への電力は、盤外から水平母線により供給される。水平母線は盤内で垂直母線に接続しており、その垂直母線から遮断器の一次側に電力が供給される構造になっている。

盤内の主な可燃物は、電源盤の構成部品であるリレー、メータ等に用いられているプラスチック類及びケーブルである。アーク放電は高圧電源盤内部の遮断器の一次側のアルミニウム製垂直母線で発生させた。アーク放電は、3.4のとおり IEEE に従って 垂直母線に導電性針金をワイヤリングした後、表3.1の試験条件で大電流を流し三相短絡させることで発生させた。

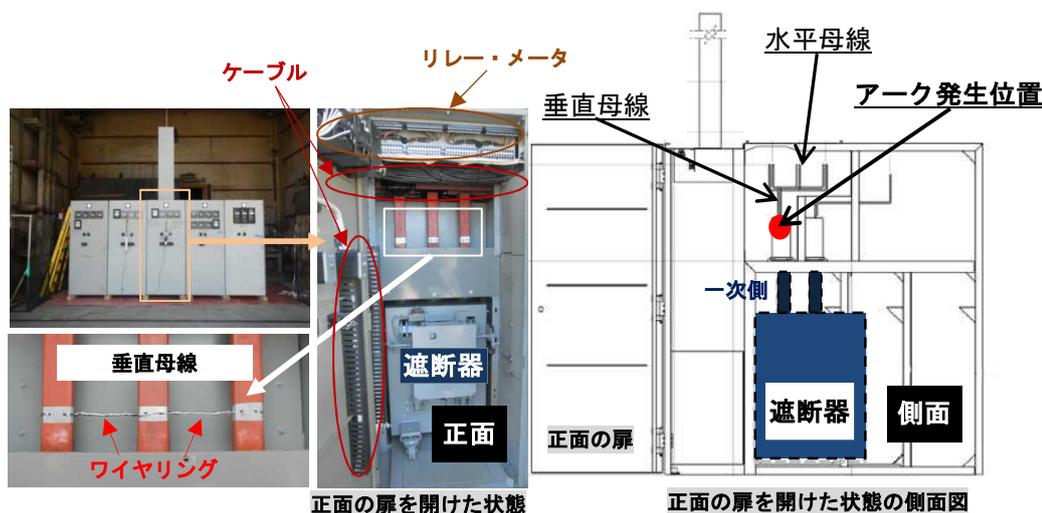


図3.4 試験に用いた高圧電源盤

Fig. 3.4 Metalclad switchgear used in the test

### 3. 6. 2 配電盤の構造及びアーク放電の発生位置

配電盤としては、米国の原子力発電所等で一般的に使用されている General Electric 社製 APN-B を用いた。配電盤（縦：889mm、横：1,143mm、高さ：2,286mm）の構造及びアーク放電の発生位置を図 3. 5 に示す。

本配電盤の定格値は、電圧 480V 及び電流 3.0kA である。配電盤への電力は、盤外から水平母線により供給される。また、水平母線は盤内で垂直母線に接続しており、その垂直母線から更に 3 個のブレーカに電力が供給される構造になっている。

盤内の主な可燃物は、ブレーカの部品であるプラスチック類及びケーブルである。アーク放電は、最下部に設置してあるブレーカ裏の銅製垂直母線部分で発生させた。また、アーク放電の発生方法は、高圧電源盤の試験と同じである。

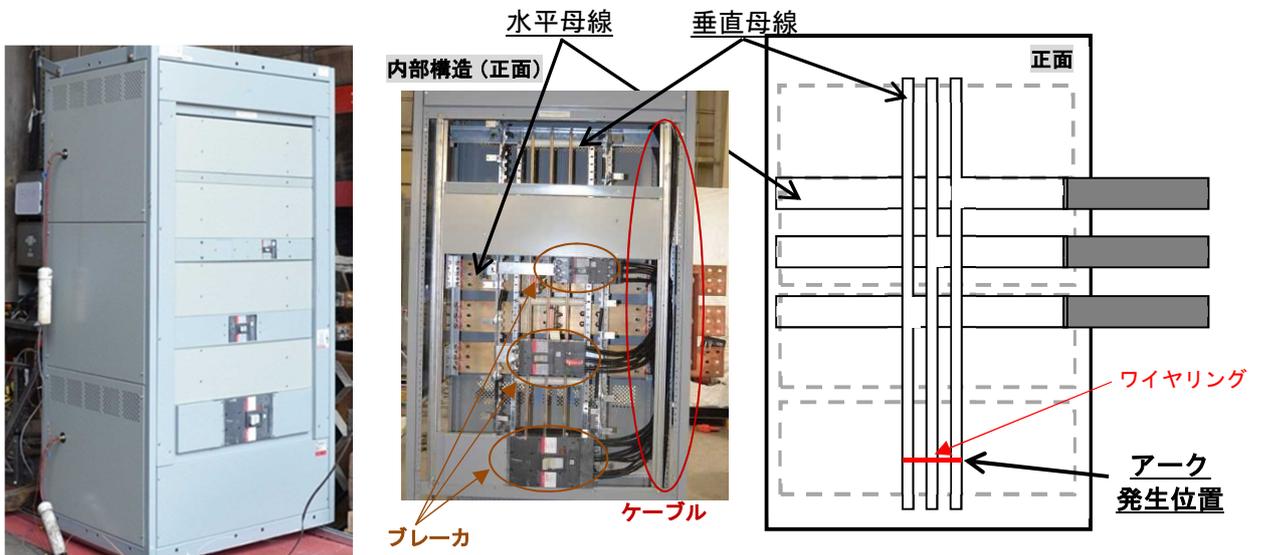


図 3. 5 試験に用いた配電盤

Fig. 3.5 Distribution panel used in the test

### 3. 6. 3 モータコントロールセンタの構造及びアーク放電の発生位置

モータコントロールセンタとしては、米国の原子力発電所等で一般的に使用されている General Electric 社製 Series 7700 MCC を用いた。モータコントロールセンタ（縦：508mm、横：508mm、高さ：2,324mm）の構造及びアーク放電の発生位置を図3. 6示す。

本モータコントロールセンタの定格値は、電圧 480V 及び電流 0.6kA である。モータコントロールセンタへの電力は、盤外から水平母線により供給される。また、水平母線は盤内で垂直母線に接続しており、その垂直母線から更に5個のブレーカに電力が供給される構造になっている。

盤内の主な可燃物は、ブレーカの部品であるプラスチック類及びケーブルである。アーク放電は、最下部に設置してあるブレーカ裏の銅製垂直母線部分で発生させた。また、アーク放電の発生方法は、高圧電源盤の試験と同じである。

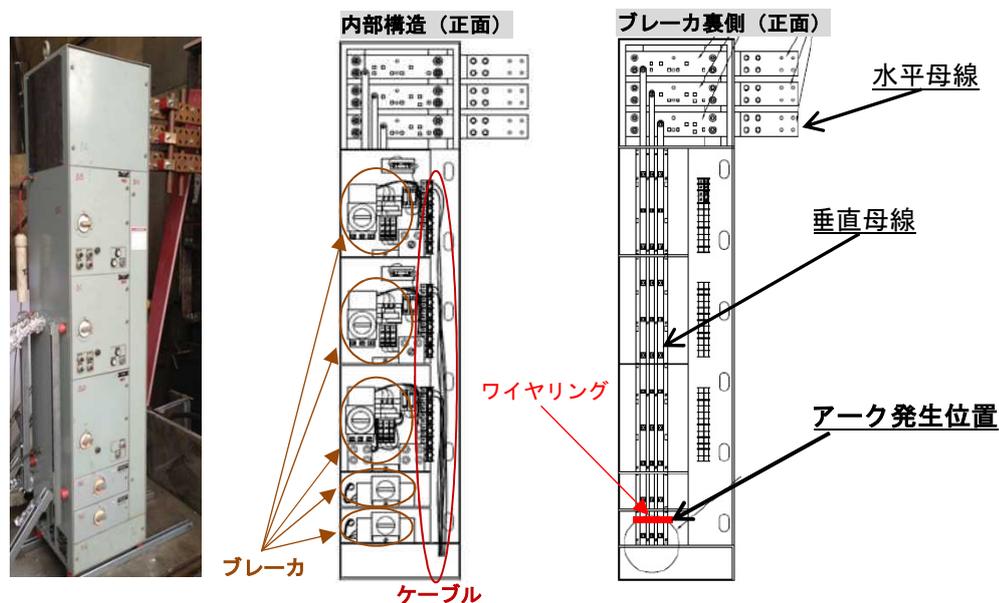


図3. 6 試験に用いたモータコントロールセンタ

Fig. 3.6 Motor control center used in the test

### 3. 7 アーク放電の継続時間の設定値

HEAF 試験におけるアーク放電の継続時間すなわち短絡時間の設定値は、女川 1 号機での遮断器における過電流継電器の設定値と同じ 2.0 秒を基準とした。また、電気回路の故障による遮断動作の遅れの可能性を考慮して、一部試験では 3.0 秒に設定した。さらに、高圧電源盤については追加で目標値 1.0 秒及び 2.5 秒の試験も行った。なお、試験結果で示すアーク放電の継続時間の実測値は、アーク放電が発生していた時間である。

### 3. 8 アークエネルギーの計算

HEAF 試験におけるアーク放電のエネルギー値 (J) は、試験体よりも上流側 (発電機側) で測定したアーク放電発生時の電圧値 (V) と電流値 (A) を乗じたアークパワー (W) にアーク放電の継続時間 (s) を掛けた三相合計の積算値とした。

### 3. 9 火災の定義

本技術報告では、アーク放電が発生し、アーク放電の熱で発生した金属蒸気の凝集物 (以下「金属ヒューム」という。) の発生後に盤内で発生する火災を「アーク火災」と定義した。

## 4 HEAF 試験結果

### 4.1 高圧電源盤

5連の高圧電源盤を用いて、電圧値 7000~7100V、短絡電流値 22.6~25.0kA 及び短絡時間 1.0/2.0/2.5/3.0 秒をアーク放電発生条件として設定し、6 回の HEAF 試験を実施した。高圧電源盤の HEAF 試験 2 の写真を図 4.1 に示す。①は試験前、②はアーク放電発生瞬間（約 0.2 秒後）、③はアーク放電・金属ヒューム等の発生（約 2 秒後）及び④はアーク火災（約 10 分後）の写真であり、事象の進展順に並べてある。②では、アーク放電・金属ヒューム等が盤内に収まりきれず一部が上部開口から盤外へ漏えいしていることが分かる。③では、金属ヒューム等が大量に発生していることが分かる。アーク火災はアーク発生から 5~7 分後に発生し、隣接する高圧電源盤及び垂直トレイ内ケーブルの二次火災を引き起こした。なお、HEAF 試験後の高圧電源盤の状況については、付録 4 に示す。

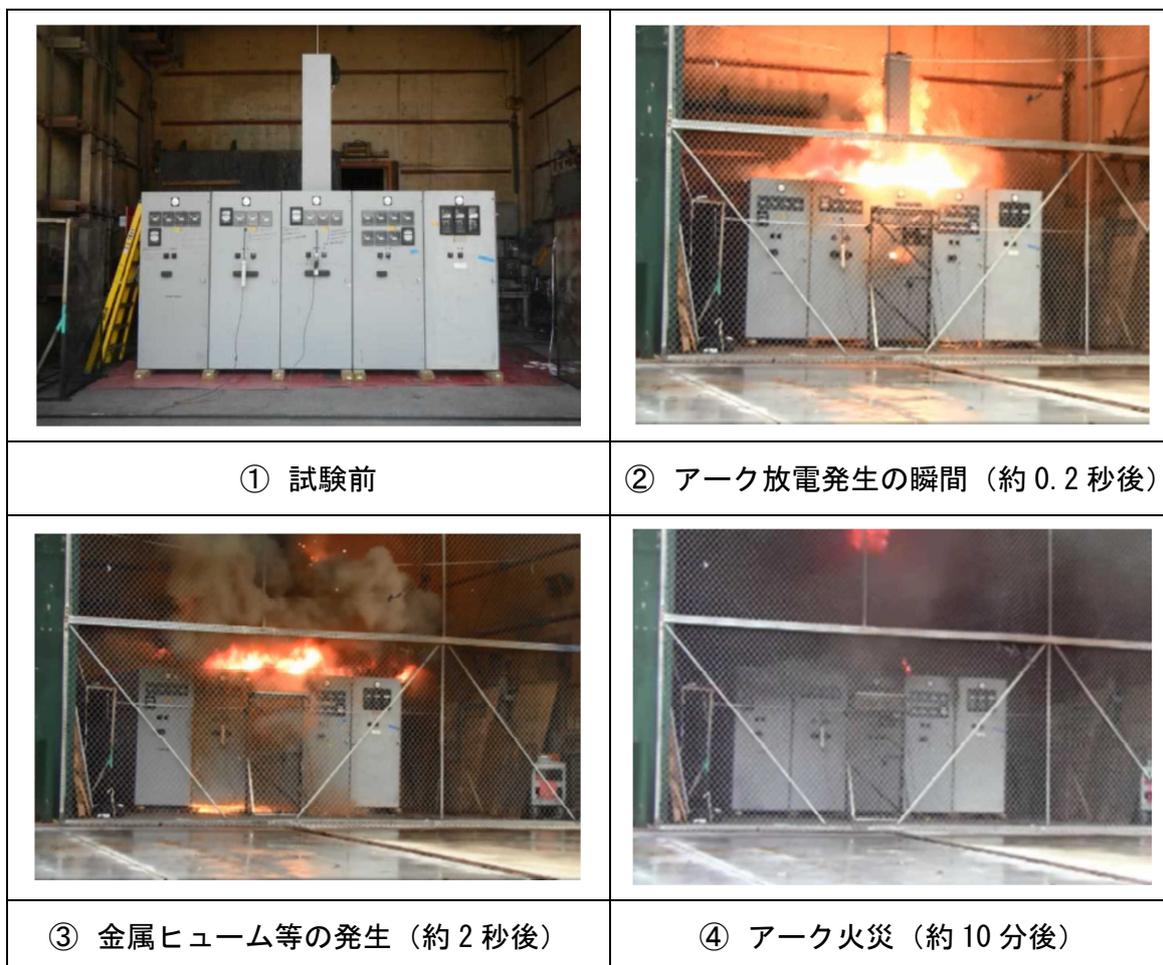


図 4.1 高圧電源盤の HEAF 試験

Fig. 4.1 HEAF test of metalclad switchgear

高圧電源盤の HEAF 試験結果の一覧を表 4. 1 に示す。本 HEAF 試験を 6 回実施した結果、4 回の試験でアーク火災が発生した。本 HEAF 試験で用いた高圧電源盤の場合、アーク火災は 42.6 MJ では発生せず、57.2 MJ で発生したことから、火災が発生するアークエネルギーの条件は 42.6～57.2MJ の間に存在することが示唆される。

表 4. 1 高圧電源盤の HEAF 試験結果

Table 4.1 HEAF test results of metalclad switchgear

高圧電源盤 HEAF 試験	電圧 (V)		電流 (kA)			アーク放電継続時間 (s)		アーク エネルギー *** (MJ)	アーク 火災
	設定値	実測値*	目標値	実測値		設定値	実測値		
				開始値**	終了値**				
<b>1</b> (50Hz)	7100	609	22.6	29.5	22.6	2.0	2.0	<b>42.6</b>	<b>無</b>
<b>2</b> (50Hz)	7100	608	23.5	30.5	23.5	3.0	3.0	<b>58.2</b>	<b>有</b>
<b>3</b> (50Hz)	7100	633	23.5	29.8	22.6	3.0	2.9	<b>64.2</b>	<b>有</b>
<b>4</b> (60Hz)	7000	726	25.0	24.5	24.4	2.5	2.4	<b>67.2</b>	<b>有</b>
<b>5</b> (60Hz)	7000	639	25.0	24.4	25.7	2.5	2.3	<b>57.2</b>	<b>有</b>
<b>6</b> (50Hz)	7000	882	25.0	24.6	21.4	1.0	1.1	<b>26.5</b>	<b>無</b>

\* 線間電圧の実測値平均、\*\* 三相電流の実測値平均、\*\*\* 電圧値 (V)、電流値 (A) 及びアーク放電の継続時間 (s) を乗じた三相合計のアークエネルギーの積算値

試験 1 から 3 の発電機は配電盤及びモータコントロールセンタと同じ 50Hz/2250MVA

試験 4 から 6 の発電機は 60Hz/1000MVA

## 4. 2 配電盤

配電盤を用いて、電圧値 480V、短絡電流値 52.3kA 及び短絡時間 2.0 秒をアーク放電発生条件として設定し、同条件下で 3 回の HEAF 試験を実施した。配電盤の HEAF 試験 1 の写真を図 4. 2 に示す。



図 4. 2 配電盤の HEAF 試験

Fig. 4.2 HEAF test of distribution panel

①は試験前、②はアーク放電発生の瞬間（約 0.1 秒後）、③はアーク放電及びアーク放電の熱で発生した金属ヒューム等の発生（約 1 秒後）及び④はアーク火災（約 10 分後）の写真である。②及び③では、金属ヒューム等が盤内に収まりきれず、一部は盤外へ漏えいしていることが分かる。アーク火災は、アーク放電発生から数分後に発生し、約 20 分間継続した。また、アーク火災時には、同時に大量のばい煙も発生した。なお、HEAF 試験後の配電盤の状況については、付録 5 に示す。

配電盤の HEAF 試験結果の一覧を表 4. 2 に示す。本 HEAF 試験を 3 回実施した結果、2 回の試験でアーク火災が発生した。本 HEAF 試験で用いた配電盤の場合、火災はアー

クエネルギー26.3 MJ では発生せず、アークエネルギー28.6 及び 37.1MJ で発生した。このため本配電盤の場合、火災が発生するアークエネルギーの条件は 26.3～28.6MJ の間に存在することが示唆される。

アーク放電の継続時間に関しては、本 HEAF 試験の設定値 2.0 秒に対して、2.0 秒間継続してアーク放電を発生できたのは 1 回のみであり、他は 1.4 又は 1.5 秒でアーク放電は消滅した。これら 2 回の試験については、アーク放電発生箇所付近の垂直母線が大きく破損していたことから、その破損によって、アーク放電は 2.0 秒間継続することができなかったものと考えられる。

表 4. 2 配電盤の HEAF 試験結果

Table 4.2 HEAF test results of distribution panel

配電盤 HEAF 試験	電圧 (V)		電流 (kA)			アーク放電継続時間 (s)		アーク エネルギー *** (MJ)	アーク 火災
	設定値	実測値*	目標値	実測値		設定値	実測値		
				開始値**	終了値**				
1	480	404	52.3	43.3	30.0	2.0	1.5	28.6	有
2	480	394	52.3	38.4	31.6	2.0	1.4	26.3	無
3	480	416	52.3	41.4	32.0	2.0	2.0	37.1	有

発電機：2250MVA/50Hz、\* 線間電圧の実測値平均、\*\* 三相電流の実測値平均

\*\*\* 電圧値 (V)、電流値 (A) 及びアーク放電の継続時間 (s) を乗じた三相合計のアークエネルギーの積算値

#### 4. 3 モータコントロールセンタ

モータコントロールセンタを用いて、電圧値 480V、短絡電流値 63.5kA 及び短絡時間 2.0 秒をアーク放電発生条件として設定し、同条件下で 4 回の HEAF 試験を実施した。モータコントロールセンタの HEAF 試験 2 の写真を図 4. 3 に示す。



図 4. 3 モータコントロールセンタの HEAF 試験

Fig. 4.3 HEAF test of motor control center

①は試験前、②はアーク放電発生の瞬間（約 0.2 秒後）、③はアーク放電・金属ヒューム等の噴出（約 0.5 秒後）及び④は金属粉塵等の発生（約 2 秒後）の写真である。③では、モータコントロールセンタの筐体が破損し、大量の金属ヒューム等が噴出していることが分かる。④では、大量の金属粉塵等が、試験セル内（横幅 5.5m × 高さ 7.0m）

の全域に広がったことが分かる。なお、HEAF 試験後のモータコントロールセンタの状況については、付録6に示す。

モータコントロールセンタの HEAF 試験結果の一覧を表4. 3に示す。4回試験を実施したが、アーク火災は一度も発生しなかった。火災が発生しなかった原因としては、アーク放電の継続時間が短かったため（4回とも0.9秒以下）、そのアークエネルギーによる発熱自体が小さかったこと、及びモータコントロールセンタの筐体が弱いためにアーク放電発生時に破損し、発生したほとんどの熱エネルギーが盤外へ放出されたことで、火災が発生するほど盤内の温度が高くならなかったこと等が考えられる。

表4. 3 モータコントロールセンタの HEAF 試験結果  
Table 4.3 HEAF test results of motor control center

モータコントロールセンタ HEAF 試験	電圧 (V)		電流 (kA)			アーク放電継続時間 (s)		アーク エネルギー *** (MJ)	アーク 火災
	設定値	実測値*	目標値	実測値		設定値	実測値		
				開始値**	終了値**				
1	480	432	63.5	21.4	11.2	2.0	0.1	1.7	無
2	480	384	63.5	34.1	25.2	2.0	0.9	17.4	無
3	480	384	63.5	40.4	26.8	2.0	0.2	4.2	無
4	480	374	63.5	46.4	37.0	2.0	0.9	17.6	無

発電機：2250MVA/50Hz、\* 線間電圧の実測値平均、\*\* 三相電流の実測値平均

\*\*\* 電圧値 (V)、電流値 (A) 及びアーク放電の継続時間 (s) を乗じた三相合計のアークエネルギーの積算値

アーク放電の継続時間に関しては、本 HEAF 試験の設定値 2.0 秒に対して、1回も 2.0 秒間継続させることはできなかった。試験後に盤内を確認したところ、4回全ての試験において垂直母線が大きく破損していた（付録6参照）。アーク放電発生時の衝撃等に耐えられず、垂直母線が破損したことが、アーク放電を 2.0 秒間継続できなかった原因であると考えられる。

#### 4. 4 HEAF 試験後の電気盤の変形等

表 4. 4 に、試験で用いた 3 種類の電気盤についての特徴及び HEAF 試験後の変形等を示す。各電気盤の内部容積、筐体強度及び閉じ込め性については、相対比較を行った。

表 4. 4 試験後の外観及び電気盤の特徴

Table 4. 4 Their photos taken after tests and characteristic features of the electric cabinets

電気盤 項目	高圧電源盤	配電盤	モータコントロールセンタ
HEAF試験後の 電気盤外観	 試験2	 試験1	 試験2
内部容積	大	中	小
筐体強度	高	中	低
閉じ込め性	中	中	高
盤内の最大圧力	20.5 ± 14.3kPa	31.7 ± 13.0kPa	51.2 ± 21.9kPa
筐体の変形等	筐体に大きな変形は認められなかった。	筐体に変形が認められた。	筐体に変形が認められた。 筐体に破損が認められた。

電気盤内の最大圧力は、発生エネルギーが同等であると仮定した場合、盤内の内部容積及び閉じ込め性に依存するものと考えられる。また、筐体の変形等は盤内の最大圧力及び筐体の強度に依存するものと考えられる。さらに、筐体の変形及び破損の影響が小さい場合には、内部容積によって盤内の温度上昇の速度が変化すると考えられる。なお、アーク放電の継続時間が長くなった場合には、筐体の強度が“高”であるほどアーク火災発生の可能性は高まると考えられる。

アーク放電発生時に測定した盤内の最大圧力については、モータコントロールセンタが最も高く、次いで配電盤、高圧電源盤の順になった。

高圧電源盤は、アーク放電の継続時間が最も長いにもかかわらず、内部容積が“大”及び閉じ込め性が“中”であるために盤内の最大圧力が三種類の電気盤の中で最も低くなったものと考えられる。また、筐体の強度が“高”であるため筐体に大きな変形は認められなかった。アーク放電発生時には、内部容積が“大”及び閉じ込め性が“中”であるため盤内の温度上昇は緩慢になると考えられ、アーク火災が発生するためにはある程度のアークエネルギーが必要であると推測される。高圧電源盤は、筐体の強度が“高”であるため、閉じ込め性が“中”であるものの、アーク放電の継続時間が長くなる場合には熱が盤内に蓄積されることとなり、アーク火災発生の可能性は高まると考えられる。

配電盤は、アーク放電の継続時間が三種類の電気盤の中で二番目であったこと、内部容積が“中”及び閉じ込め性が“中”であるために盤内の最大圧力が三種類の電気盤の中で二番目になったものと考えられる。また、筐体の強度が“中”であっても筐体に変形が認められた。アーク放電発生時には、筐体の変形等によって盤内で発生した熱エネルギーの一部が放出されるが、内部容積が“中”であるため盤内の温度上昇は急峻になると考えられ、小さいアークエネルギーであってもアーク火災発生の可能性は高まると推測される。

モータコントロールセンタは、アーク放電の継続時間が最も短いにもかかわらず、内部容積が“小”及び閉じ込め性が“高”であるために盤内の最大圧力が三種類の電気盤の中で最も高くなったものと考えられる。また、盤内の最大圧力が高いことに加え、筐体の強度が“低”のため、筐体に変形及び破損が認められた。このことから、アーク放電発生時には、筐体の変形及び破損によって盤内で発生した熱エネルギーが放出されるため、盤外への影響は大きくなる一方、盤内の温度上昇は低く、アーク火災の発生可能性は低くなるものと考えられる。

#### 4. 5 女川1号機と本 HEAF 試験結果における高圧電源盤の損傷状況の比較

図2. 1に女川1号機で撮影された高圧電源盤の損傷状況を、また、表4. 4及び付録4に本 HEAF 試験で用いた高圧電源盤の HEAF 試験終了後の状況を示した。HEAF 試験終了後の高圧電源盤の損傷の状況は、女川1号機の高圧電源盤ほど過酷ではない。さらに遮断器や高圧電源盤の後方に取り付けたサンプルケーブルについても、女川1号機の高圧電源盤ほど激しい損傷は認められなかった。

女川1号機の事例では損傷状況の分析から、アーク放電は異なる高圧電源盤で2回発生したとされている。一方、本 HEAF 試験における高圧電源盤のアーク放電は1回である。したがって、損傷状況に差異が生じた理由は、女川1号機の場合より本 HEAF 試験はアークエネルギーが小さかったためと考えられる。

また、女川1号機の事例では、アルミニウム製母線の焼損（酸化）が本 HEAF 試験結果より過大であり、アルミニウムの酸化によって膨大な熱エネルギーが放出することにより、盤内がより高温になった影響で更に甚大な被害が発生した可能性があるものと考えられる。

## 5. HEAF 試験で発生したアーク放電の特性

アーク放電とは、二つの電極間で放電することによって生じる絶縁破壊である。アーク放電においては、負極・正極間の気体分子が電離しイオン化することによってプラズマ状態を生み出し、その中を電流が流れる。結果的に、通常は電導性のない気体中を電流が流れることになる。

アーク放電は、基本パラメータである電圧及び電流の影響を受ける。ここでは、試験で得られたアーク放電時の電圧及び電流を基に、その特性やエネルギーレベルについて検討した。

### 5. 1 HEAF 試験における電流、電圧及びアークパワー

#### 5. 1. 1 高圧電源盤

高圧電源盤の HEAF 試験における電圧、電流及びアークパワーの波形を図 5. 1 に示す。

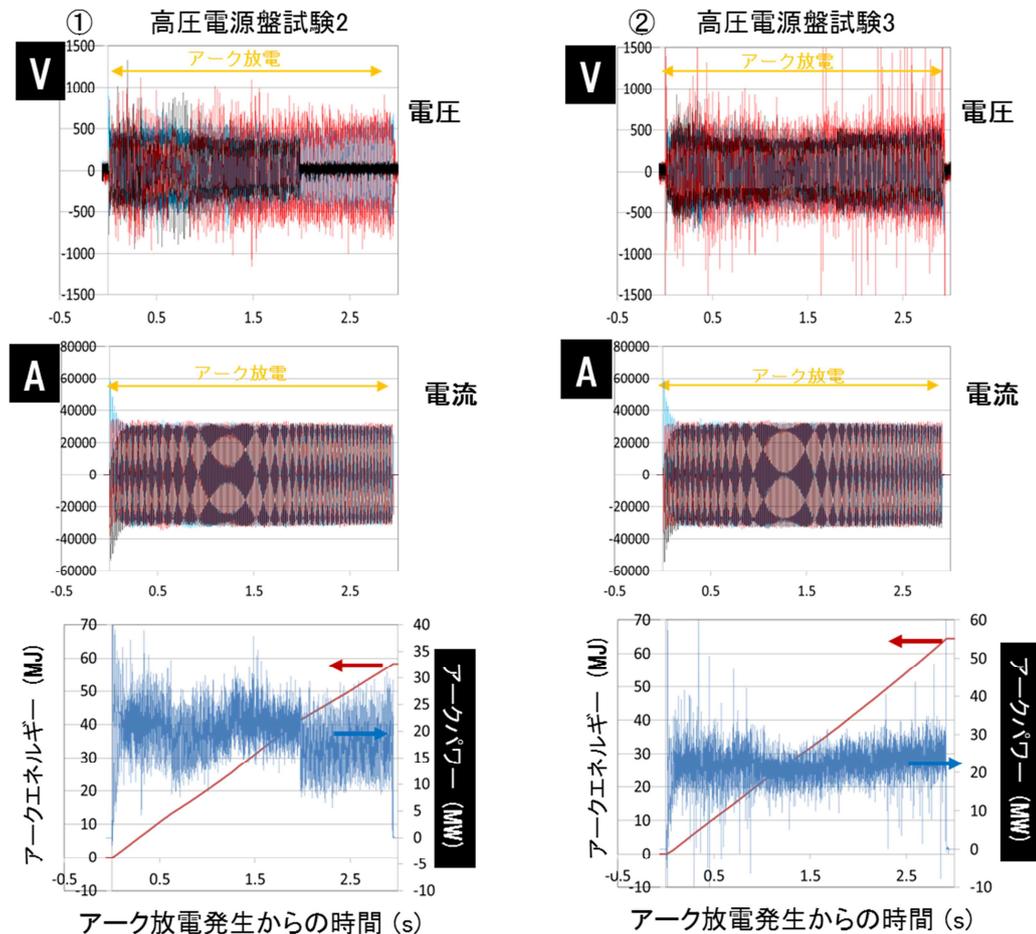


図 5. 1 高圧電源盤の HEAF 試験の波形 (電圧、電流及びアークパワー)

Fig 5.1 Waveforms obtained from M/C HEAF tests (voltage, electric current and arc power)

①はアーク放電の継続時間が 3.0 秒、②はアーク放電の継続時間が 2.9 秒である。アーク放電の継続中は、電圧及び電流が変動するために、これらに乗じたアークパワー（図 5. 1 の青線）も変動するが、①及び②ともにおおよそ 20MW 前後のアークパワーの値になった。なお、①では 2.1 秒付近で一相アークが消滅したためアークパワーの低下が認められる。

最終的に①のアークエネルギーは 58. 2MJ、②のアークエネルギーは 64. 2MJ になった。

### 5. 1. 2 配電盤

配電盤の HEAF 試験における電圧、電流及びアークパワーの波形を図 5. 2 に示す。

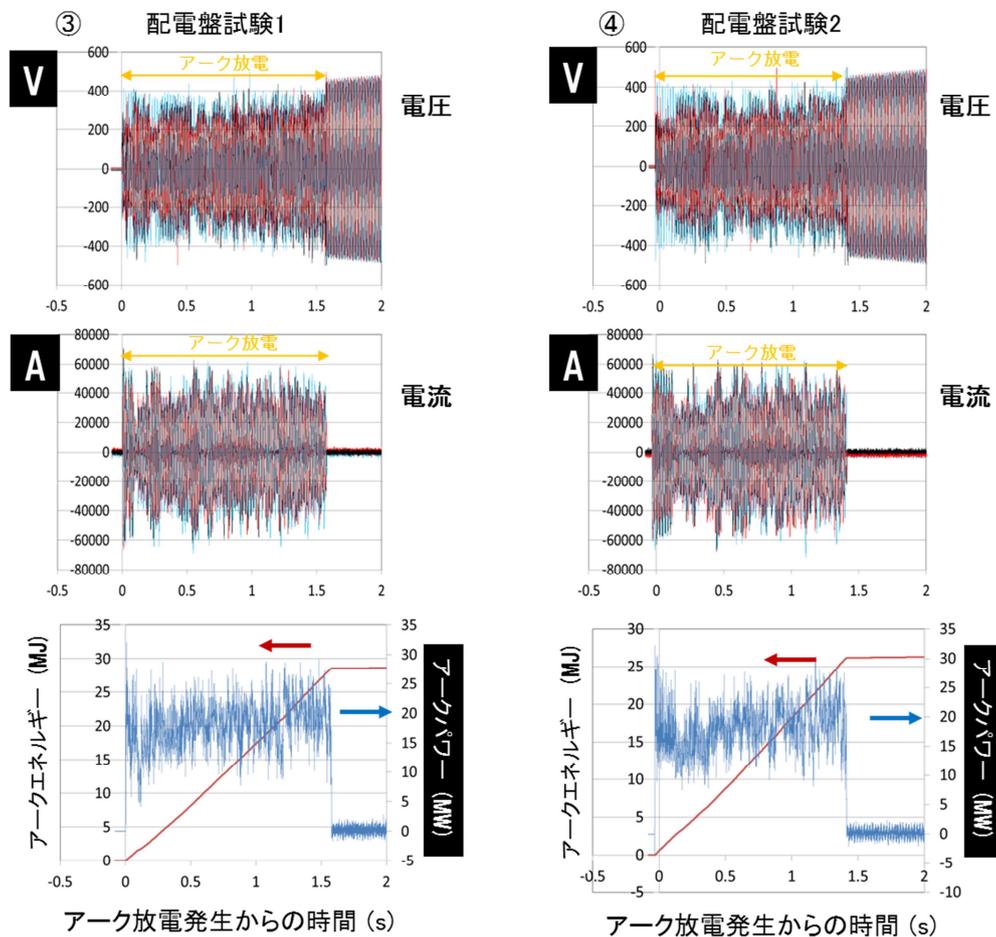


図 5. 2 配電盤の HEAF 試験の波形（電圧、電流及びアークパワー）

Fig 5.2 Waveforms obtained from DP HEAF tests (voltage, electric current and arc power)

③はアーク放電の継続時間が 1.5 秒、④はアーク放電の継続時間が 1.4 秒である。アーク放電の継続中は、電圧及び電流が変動するため、これらに乗じたアークパワー(図 5. 2 の青線)も変動するが、③及び④ともにおおよそ 20MW 前後のアークパワーの値になった。

最終的に③のアークエネルギーは 28.6MJ、④のアークエネルギーは 26.3MJ と計算された。

### 5. 1. 3 モータコントロールセンタ

モータコントロールセンタの HEAF 試験における電圧、電流及びアークパワーの波形を図 5. 3 に示す。

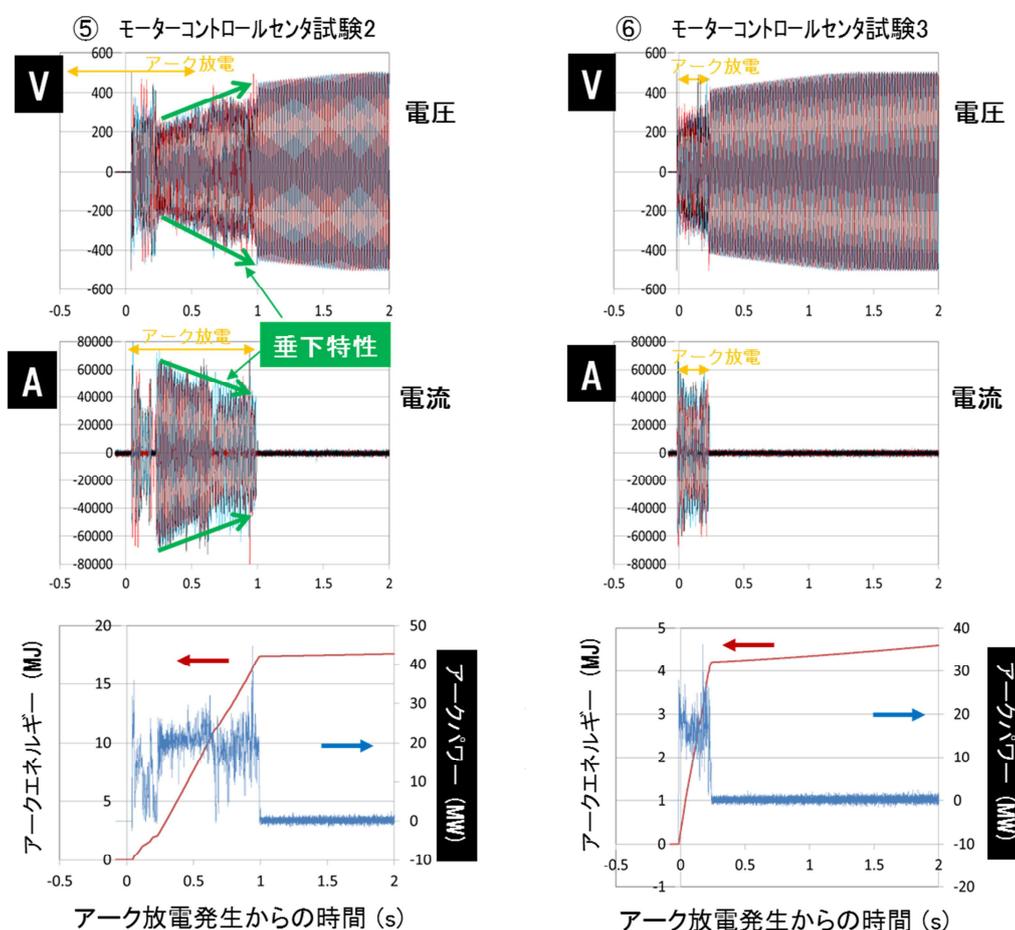


図 5. 3 モータコントロールセンタの HEAF 試験の波形 (電圧、電流及びアークパワー)

Fig 5.3 Waveforms obtained from MCC HEAF tests (voltage, electric current and arc power)

⑤はアーク放電の継続時間が0.9秒、⑥はアーク放電の継続時間が0.2秒であり、その間の電圧、電流及びアークパワーの波形を確認することができる。アーク放電継続中は、電圧及び電流が変動するために、これらを乗じたアークパワー（図5.3の青線）も変動するが、⑤及び⑥ともにおおよそ20MW前後のアークパワーになった。⑤については、電圧が大きくなると電流が小さくなるというアーク放電の垂下特性（図5.3の緑線）が認められた。

最終的に⑤のアークエネルギーは17.4MJ、⑥のアークエネルギーは4.2MJと計算された。モータコントロールセンタのアークパワーについては、その値はほぼ一定であることから、アークエネルギーはその継続時間に大きく依存することが確認できた。

## 5.2 アークエネルギーとアーク放電の継続時間との関係

各電気盤におけるHEAF試験の設定条件等について、図5.1から図5.3に示した代表的なものを表5.1に示す。また、表4.1から4.3におけるアークエネルギーとアークの継続時間との関係を図5.4に示す。

表5.1 各電気盤におけるHEAF試験結果

Table 5.1 HEAF test results in each electric cabinet

HEAF Test	電圧 (V)		電流 (kA)			アーク継続時間 (s)		アークエネルギー *** (MJ)	アーク火災
	設定値	実測値*	目標値	実測値		設定値	実測値		
				開始値**	終了値**				
① 高圧電源盤 試験2	7100	608	23.5	30.5	23.5	3.0	3.0	58.2	有
② 高圧電源盤 試験3	7100	633	23.5	29.8	22.6	3.0	2.9	64.2	有
③ 配電盤 試験1	480	404	52.3	43.3	30.0	2.0	1.5	28.6	有
④ 配電盤 試験2	480	394	52.3	38.4	31.6	2.0	1.4	26.3	無
⑤ モーターコントロールセンタ 試験2	480	384	63.5	34.1	25.2	2.0	0.9	17.4	無
⑥ モーターコントロールセンタ 試験3	480	384	63.5	40.4	26.8	2.0	0.2	4.2	無

\* 線間電圧の実測値平均、\*\* 三相電流の実測値平均

\*\*\* 電圧値 (V)、電流値 (A) 及びアーク放電の継続時間 (s) を乗じた三相合計のアークエネルギーの積算値

図に示すように本 HEAF 試験では、個々の電気盤についてアークエネルギーとアーク放電の継続時間の間に比例関係が認められ、アークパワーがほぼ一定になった。高圧電源盤の中にアークパワーがやや大きい結果が存在するものの、それ以外の電気盤においてはアークパワーがほぼ同等の値になった。

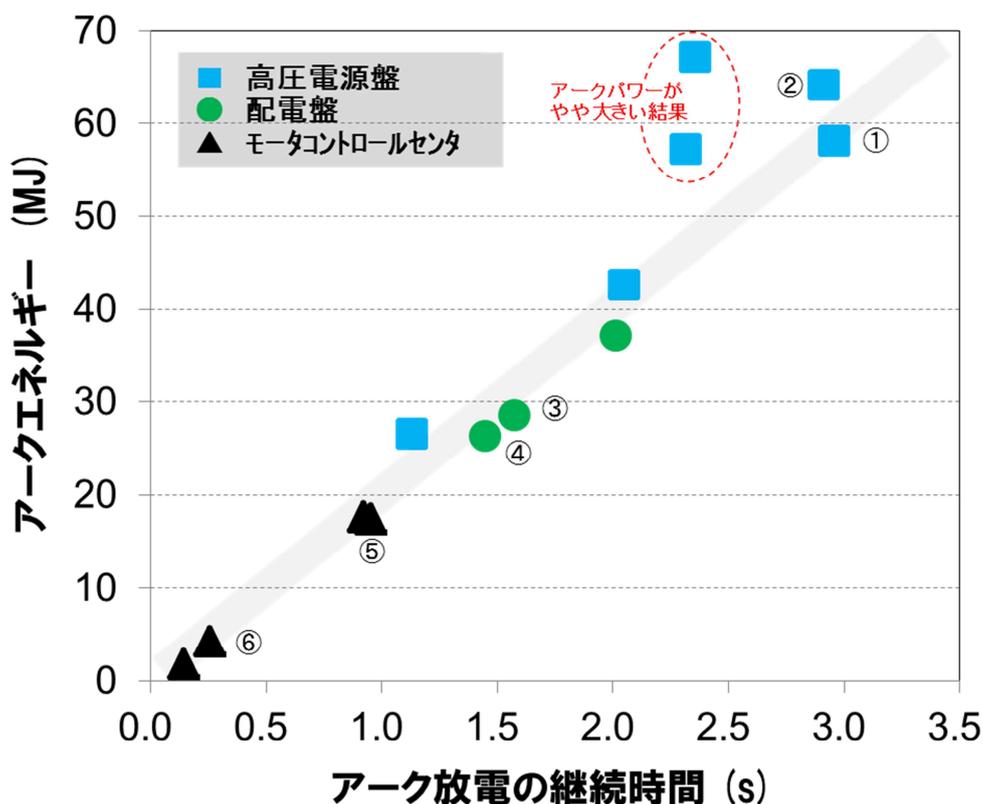


図 5. 4 アーク放電の継続時間とアークエネルギーの関係性  
 Fig 5.4 Relationship between arc duration and arc energy

このことは、本 HEAF 試験で対象としたような大電流のアーク放電が電気盤内で発生した場合には、そのアークパワーが電気盤の種類、設定の電圧・電流値、短絡電圧・電流値に大きくは依存しないことを示唆している。

### 5. 3 HEAF 試験のアークパワーに関する考察

5. 1 及び 5. 2 で記述したとおり、本 HEAF 試験ではアークパワーがほぼ一定になっていることから、ここでは、アークパワーが一定になる理由について考察する。また、高圧電源盤の結果の中にアークパワーがやや大きいものが存在する理由についても考察する。

#### 5. 3. 1 アーク放電のエネルギーモデル

ある一定の距離をとる二つの電極間に発生するアーク放電のエネルギーモデル及びそのモデルに基づいたアークパワーの構成式を、図 5. 5 及び式 5. 1 に示す。アークパワーは単位時間当たりのアークエネルギーであり、アークジェットのエネルギー密度 ( $\text{J}/\text{m}^3$ )、流速 ( $\text{m}/\text{s}$ ) 及び断面積 ( $\text{m}^2$ ) を乗じた値として表される。また、アークジェットの断面積は、その流速及び電流と電磁力により中心方向に働く力(電磁的ピンチ力)等の作用によって決まると考えられている。

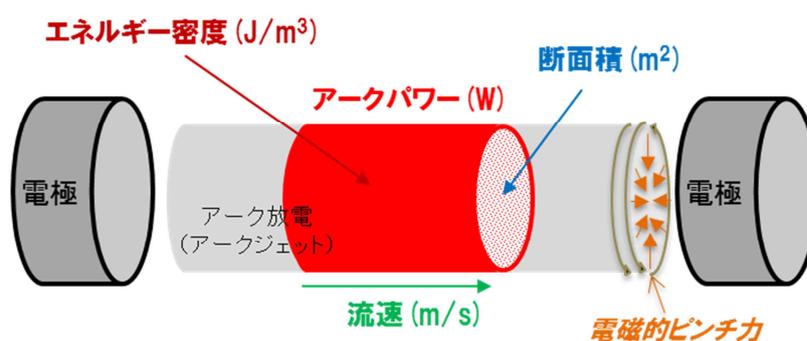


図 5. 5 アーク放電のエネルギーモデル

Fig 5.5 Energy model of arc discharge

$$\text{アークパワー (W)} = \text{エネルギー密度 (J/m}^3\text{)} \times \text{流速 (m/s)} \times \text{断面積 (m}^2\text{)} \cdots \cdots \text{(式 5. 1)}$$

#### 5. 3. 2 アーク放電に係るデータ

本 HEAF 試験における試験条件範囲に対応したアーク放電に係るパラメータとして、アークジェットのエネルギー密度、流速及び直径に関しては、過去に実施された試験に基づくデータが公開されている(参 11~13)。公開されているアーク放電に係るデータの一覧を表 5. 2 に示す。

表 5. 2 アーク放電に係る公開データの一覧

Table 5.2 List of published data about arc discharge

パラメータ	測定方法等	測定箇所	測定及び計算結果*
エネルギー密度 [J/m <sup>3</sup> ]	アーク温度及び金属混入率の測定並びにアークの熱力学特性計算から、エネルギー密度を算出 (アークの温度:9,000~15,000K)		アーク温度、電極材質(銅、アルミニウム、鉄)等によらず おおむね:8.0~9.0×10 <sup>5</sup> J/m <sup>3</sup> (参11, 12)
アークジェット流速 [m/s]	(フォトマル装置) 2地点(20mm間隔)の 放射強度波形測定	電極端面から100~ 300mm離れた 1.7mmφ相当の円	電極がアルミニウムの場合:500~約3000m/s 電極が鉄の場合:700~約4000m/s (測定ばらつきが大きい) (参13)
アークジェット直径 [mm]	(高速度ビデオカメラ) 画像解析	電極端面から100~ 300mm離れた アーク放電全体	電極がアルミニウム及び鉄の場合: 電極直径20、40mm及び60mmのものを用いて電極端面 100~300mmの距離でアーク直径は15~75mm (電極直径の影響は小さいが、測定ばらつきが大きい) (参13)

\*試験条件：大気圧、単相、電極間距離 1.5m~3.4m、アーク放電の電流値 10kA~50kA、周波数 50Hz、通電時間 120ms

各パラメータについては、電極材質を変更した試験が実施されている。表 5. 2 に示すアーク放電の試験条件において、電極材料が異なる場合の温度及び電極蒸気混入率が報告されている(参11)。銅電極の場合は、アーク放電の電流値が 10kA から 50kA に増加するとアーク温度は 11,000K から 10,000K に低下する。また、同条件で銅電極の混入率は 0.03~2%前後とされている。本 HEAF 試験で用いたモータコントロールセンタ及び配電盤の母線は銅製であり、アーク放電の電流値が 40~50kA 程度であることからアーク温度は 10,000K 程度、銅蒸気の混入率は 2%程度であると推測される。

同様にアルミニウム電極の場合は、アーク放電の電流値 30kA においてアーク温度は 11,000K 前後とされており、アルミニウム蒸気の混入率は 15%前後になるとされている(参11)。本 HEAF 試験で用いた高圧電源盤の母線はアルミニウム製であり、アーク放電の電流値が 25~35kA 程度であることからアーク温度は 11,000K 前後、アルミニウム蒸気の混入率は 15%程度であると推測される。

表 5. 2 に示したように電流値 10kA~50kA でアーク放電を発生させた場合には、9,000~15,000K 程度のアーク温度になることが観測されており、これらの条件におけるエネルギー密度はアーク温度及び電極材料(銅、アルミニウム又は鉄)等によらずおおむね 8.0~9.0×10<sup>5</sup>J/m<sup>3</sup> になることが報告されている(参11, 12)。したがって、本 HEAF 試験においてもアーク放電のエネルギー密度は、8.0~9.0×10<sup>5</sup>J/m<sup>3</sup> であったと推測される。

アークジェットの流速については、アルミニウム及び鉄製の電極(20~60mm)を用いたアーク放電の電流値 10~50kA の測定値が報告されている(参13)。流速は、アルミニウム電極で 500~3000 m/s、鉄電極で 700~4000 m/s の範囲である。これら流速とアークジェットの直径の関係は、直径が大きいほど流速は小さくなる傾向にあることが測定結果(参13)により明らかにされている。これは、主に電磁的ピンチ力の作用によるものであると考えられる。

### 5. 3. 3 アークパワーが一定になる理由について

本 HEAF 試験でアークパワーがほぼ一定になる理由について考察した結果を以下に示す。

5. 3. 1 に述べたように、図 5. 5 に示したアーク放電のモデルに基づけば、アークパワーの構成式は、式 5. 1 になる。

アークジェットのエネルギー密度については、5. 3. 2 に述べたとおり本 HEAF 試験の条件範囲内ではおおむね  $8.0 \sim 9.0 \times 10^5 \text{ J/m}^3$  になると推測される。アークパワーが一定になる要因の一つとして、このエネルギー密度が本 HEAF 試験条件の範囲内では、あまり変化しないことが考えられる。

アークジェットの断面積は、その流速及び電流と電磁的ピンチ力等の作用によって決まると考えられている。したがって、アークパワーが一定になるもう一つの要因として、断面積が大きいほど流速は小さくなるという反比例の関係になっていることが考えられる。

上記より、アークパワーが一定になるのは、アークジェットのエネルギー密度が本 HEAF 試験条件によってあまり変化しないこと、及び流速と断面積が反比例の関係になっていることが理由であると推測される。

### 5. 3. 4 高圧電源盤でアークパワーがやや大きくなった理由について

図 5. 4 に示したように、本 HEAF 試験の結果において、2 点の高圧電源盤の試験で、他と比較してアークパワーのやや大きいデータが得られた。これは、アーク放電の継続時間が長かったこと及び高圧電源盤の内部で発生したアークエネルギーが閉じ込められることによって熱が蓄積され、盤内温度が上昇したことが原因であると考えられる。すなわち、盤内温度の上昇に伴い、アークジェットの温度が上昇することで流速が大きくなったこと、及び雰囲気温度の上昇によりピンチ力が低下し断面積を小さくしようとする力が弱まったことがアークパワー増加の原因と考えられる。これらについて以下にその理由を考察する。

アークジェットは熱プラズマである。熱プラズマ中の気体分子（原子）、イオン、電子は互いに衝突しつつ運動をしている。イオンと電子は、気体分子（原子）の熱運動により大きな運動エネルギーを電界によって得ることができるが、他の粒子との衝突により運動エネルギーのやりとりをして、ある定常状態になっていると考えられる。この定常状態では、平均運動エネルギーから温度を次のように定義できる。ここで  $T$  は温度、 $m$  は質量、 $v$  は速度及び  $K_B$  はボルツマン定数 ( $K_B \doteq 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ) である。

$$\frac{1}{2}mv^2 = CK_B T \quad \dots \dots \dots \text{(式 5. 2)}$$

$$C = \frac{3}{2} : \text{単原子分子の場合、} C = \frac{5}{2} : \text{2原子分子の場合}$$

したがって、熱流速は式5.2に示すように、温度の平方根の関数になると考えられ、盤内温度が上昇するとともにアークジェットの流れが大きくなると推定される。

また、アーク放電の外周部は気流、拡散等によって冷却されるため、外周部の電気伝導性が低下し、電流には中心部分の流れようとする力（熱的ピンチ力）が常に働いている。そのため、高温中でアーク放電が発生した場合には、外周部の冷却条件が緩和されることにより熱的ピンチ力の作用が低下すると考えられる。前述したように、アークジェットの流速と断面積は反比例の関係にあるが、高温になるとアークジェットの流速が高くなった場合の断面積（直径）の減少は小さくなるものと考えられる。したがって、熱的ピンチ力の低下を考慮した場合、高温になるほどアークパワーが増加することが予想される。

これらに加えて、金属（アルミニウム）製母線は、酸化によって膨大な熱エネルギーを放出することが知られており、アーク放電の継続時間とは別にその熱エネルギーの放出によってアークジェット及びアークジェットの周囲がより高温になった場合に、それによる影響でアークジェットの流速が加速され更にアークパワーが増加した可能性もあると考えられる。

本 HEAF 試験条件の範囲外では、例えば筐体の大きさ（空間容積）が小さい場合、電気盤の閉じ込め性が高い場合、電極（金属製母線）の種類が異なる場合、アーク放電の継続時間が長い場合、アーク放電の周囲が高温である場合、アークジェットが共存酸素の影響を受ける場合、アークジェットが電極（金属製母線）の酸化等の影響を受ける場合、アークジェットの周囲で電極（金属製母線）及び金属ヒューム等の酸化によって膨大な熱が発生する場合、金属ヒューム等の酸化によって酸化物が発生し、アークジェットの抵抗値が増加することでジュール熱が発生する場合などでは、アークジェット及びその周囲の温度がより高温になると考えられるため、アークパワーが大きくなることが予想される。

## 6. アーク放電による火災の発生

本 HEAF 試験は、配電盤 3 回、モータコントロールセンタ 4 回及び高圧電源盤 6 回の合計 13 回行った。13 回の HEAF 試験の中で、配電盤 2 回及び高圧電源盤 4 回の合計 6 回について、アーク火災が発生した。ここでは、火災の発生とアークエネルギーの関係を整理した上で、火災発生の評価及び抑制に関する考え方について考察する。

### 6. 1 火災の発生とアークエネルギーの関係

図 6. 1 には、図 5. 4 で示した HEAF 試験時に発生したアークエネルギーとアーク放電の継続時間との関係にアーク火災が発生した試験を赤塗りして示した。

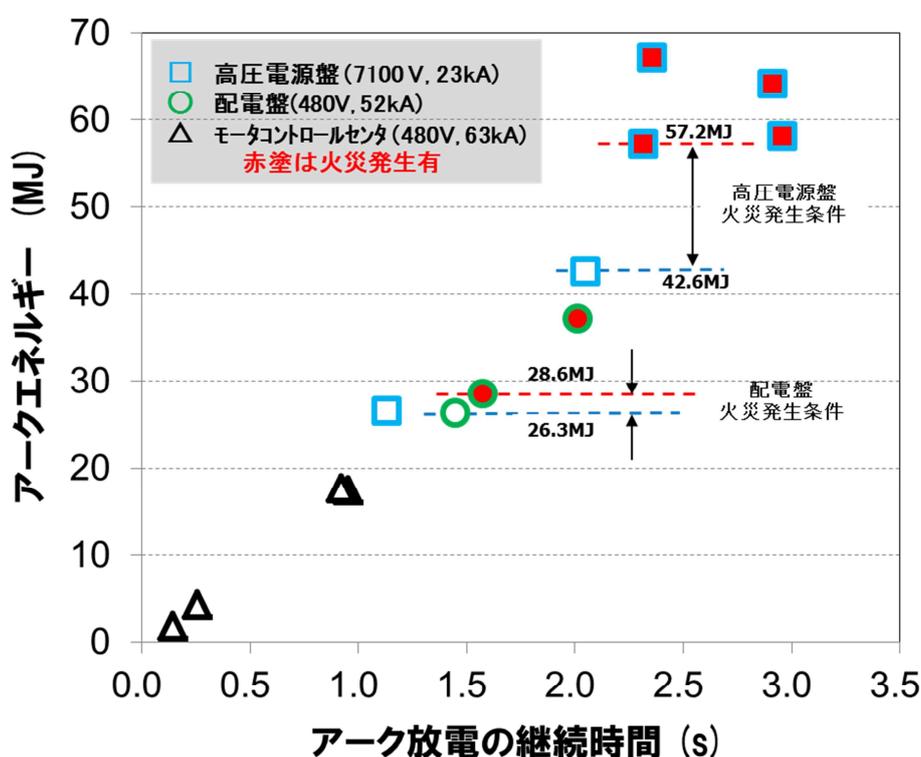


図 6. 1 火災の発生に必要なアークエネルギー

Fig 6.1 Arc energy necessary for causing fire

既に述べたように、本 HEAF 試験で用いた高圧電源盤の場合、アーク火災が発生するアークエネルギーの条件は 42.6~57.2MJ の間に存在し、配電盤の場合、アーク火災が発生するアークエネルギーの条件は 26.3~28.6MJ の間に存在することが示唆された。これらの試験結果から、アーク放電の継続時間を短くしアークエネルギーを小さくすることで、アーク火災の発生を抑制できる可能性があると考えられる。なお、HEAF 事象によるアーク火災はアーク発生直後ではなく、アーク発生から数分後に確認されたものである (図 4. 1 ④及び図 4. 2 ④を参照)。アーク火災が発生する理由は、発生した

アークエネルギーが盤内のケーブル等の可燃物を加熱し、可燃物を発火させたためと考えられる。

## 6. 2 火災発生の評価及び抑制に関する考え方

配電盤と高圧電源盤では、アーク火災発生に必要なアークエネルギーが異なることが示された。また、4. 4で述べたように高圧電源盤と配電盤は、その筐体の大きさ（空間容積）や盤内の閉じ込め性が大きく異なる。したがって、アーク火災の発生に必要なエネルギーは各電気盤内の空間容積の大小や閉じ込め性の高低と関係するものと考えられる。例えば、電気盤の内部容積が小さいと、盤内の温度がより高くなり、内部容積が大きい場合に比べて、低いアークエネルギーでの盤内ケーブル等可燃物の火災発生の可能性は高くなる。また、電気盤の閉じ込め性が高いと、エネルギーの外部放出が少なくなり、閉じ込め性の低い場合に比べて、低いアークエネルギーでの盤内ケーブル等可燃物の火災発生の可能性は高くなる。これらのことは、図6. 1に示す高圧電源盤と配電盤での試験結果から明らかである。すなわち、高圧電源盤では配電盤に比べて盤内の空間容積が大きく、また、天井部に通気口等があり配電盤に比べて閉じ込め性が低いために、アーク火災発生に必要なエネルギーが配電盤のそれに比べて20MJ以上高くなった。したがって、アーク火災発生に関する評価では、電気盤の空間容積及び開口の状況（閉じ込め性）を把握し、評価に際して適切に考慮する必要がある。

なお、本 HEAF 試験の結果から、アーク放電の継続時間を短くすることができれば、アークエネルギーは小さくなるため、アーク火災の発生を抑えることが可能になる。

## 7. HEAF 事象の影響範囲

本 HEAF 試験の目的は、HEAF 事象におけるアーク放電の特性や火災の発生に関わる知見を得ることに加えて、電気盤内で発生したアーク放電が盤外に及ぼす影響に関する知見を得ることである。この章では HEAF 試験における熱流束の測定結果に基づき、HEAF 事象における ZOI の考え方に関して考察する。

### 7. 1 熱流束の測定ポイントの設定

本 HEAF 試験では、3. 5 に述べたとおり、HEAF 事象が発生した際にアークが電気盤外に及ぼす影響について、熱流束を測定することにより知見を得ることとした。熱流束は、ケーブルのような可燃物が火災により損傷するかどうかを判断する上で重要なパラメータである。このため、米国 NRC の火災防護に係る規制基準<sup>(参3)</sup>に準じて、一般の火災に対する電気盤の ZOI を参考に、図 7. 1 に示すように電気盤の上部では 1.5m、前面及び側面では 0.9m 離れた位置において熱流束を測定した。

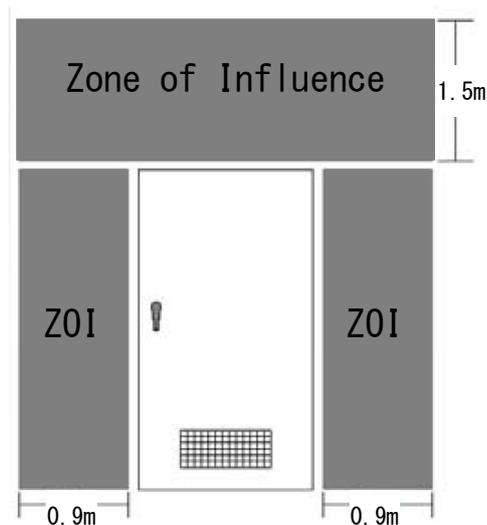


図 7. 1 HEAF 以外の火災に対する電気盤の ZOI

Fig 7.1 ZOI of electric cabinet for fire events except for HEAF

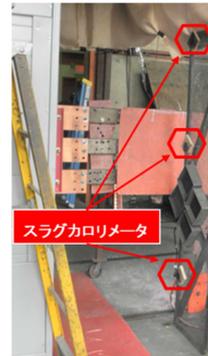
(出典 NUREG/CR-6850)

### 7. 2 熱流束の測定

熱流束の測定は、図 7. 2 に示すような ASTM 規格 F 1959 で規定されるスラグカロリメータを用いた。また、そのスラグカロリメータを前述の位置に 4~6 台一定間隔で設置した。



スラグカロリメータ



設置状況（電気盤側面 0.9m での測定の例）

図 7. 2 熱流束の測定

Fig. 7.2 Measurement of heat flux

### 7. 3 熱流束の測定結果

表 7. 1 に各電気盤における熱流束の測定結果を示す。表に示すようにアークエネルギーの増加に伴って、測定ポイントにおける最大熱流束は大きくなる傾向を示した。また、今回測定した各電気盤における最大熱流束は、38～107kW/m<sup>2</sup>であり、一般的に想定される火災源の熱流束と比較して非常に大きい値であった。

表 7. 1 各電気盤における熱流束の測定結果

Table 7.1 Measured heat flux for each electric cabinet

HEAF Test	アーク 継続時間 (s)	アーク エネルギー (MJ)	測定ポイントにおける 最大熱流束 (kW/m <sup>2</sup> )
モーターコントロールセンタ試験1	0.1	1.7	38.4
モーターコントロールセンタ試験2	0.9	17.4	46.1
配電盤 試験2	1.4	26.3	63.2
配電盤 試験1	1.5	28.6	53.8
高圧電源盤 試験2	3.0	58.2	71.3
高圧電源盤 試験3	2.9	64.2	107.3

## 7. 4 熱流束に関する考察

ここでは、一般火災に対するケーブルの損傷基準に着目し、測定された熱流束の値について考察する。表 7. 2 には、NUREG/CR-6850<sup>(参3)</sup> の表 H-1 に記載されているケーブルの損傷基準（発火と損傷判断のための判定基準）に関する熱流束の値を示す。同表には、熱可塑性\*及び熱硬化性\*\*のケーブルに対して損傷をもたらすと判断される熱流束が示されている。

本 HEAF 試験において測定された最大熱流束は、107kW/m<sup>2</sup>であった。これは、熱可塑性ケーブルの損傷基準値 6kW/m<sup>2</sup> 及び熱硬化性ケーブルの損傷基準値 11kW/m<sup>2</sup> よりもはるかに高い値である。したがって、同表に基づけば、熱流束測定地点にケーブルが存在する場合、そのケーブルは損傷すると評価される。

また、表 7. 3 には、NUREG/CR-6850<sup>(参3)</sup> の表 H-8 に記載されている熱可塑性ケーブルの損傷発生時間と熱流束との関係を示す。この表は熱流束が 16kW/m<sup>2</sup> 以上の場合でも 1 分以内の継続時間であれば、熱可塑性ケーブルは損傷を受けないということを意味している。本 HEAF 試験における最大熱流束は、107kW/m<sup>2</sup> であり、3 秒以内に測定された。表 7. 3 のケーブルの損傷基準は、一般的に想定される火災熱源に対するものであることから、今回対象としている大電流のアーク放電が熱源となる場合には、より短時間・高熱流束の条件に対応したケーブル損傷基準が必要になると考えられる。

表 7. 2 ケーブルの損傷基準（発火と損傷判断のための判定基準）

Table 7.2 Damage criteria for cable - generic screening criteria for assessment of the ignition and damage potential

(NUREG/CR-6850 Appendix H Table H-1)

ケーブルタイプ	熱流束の判定基準	温度の判定基準
熱可塑性	6 kW/m <sup>2</sup>	205°C
熱硬化性	11 kW/m <sup>2</sup>	330°C

- \* 熱可塑性：加熱及び再加熱によって軟化又は再軟化する可能性がある材料。電気故障は、149°C（300°F）程度の低い温度における熱可塑性絶縁材の軟化及び流動化によって引き起こされる場合がある。
- \*\* 熱硬化性：化学反応によって硬化し、加熱しても軟化しない。過度に昇温すると熱硬化性絶縁材は硬くなる。熱硬化性電導体絶縁材は、通常、260°C（500°F）程度の高い温度に短時間曝してもその電気特性を保持する。

表 7. 3 熱可塑性ケーブルの損傷発生時間と熱流束との関係

Table 7.3 Failure Time - Heat Flux Relationship for thermoplastic cables  
(NUREG/CR-6850 Appendix H Table H-8)

外部熱流束 (kW/m <sup>2</sup> )	損傷までの時間 (分)
<6	損傷なし
6	19
8	10
10	6
11	4
14	2
16 以上	1

## 8. まとめ

高エネルギーアーク損傷 (HEAF) における事象進展、HEAF によりアーク火災が発生するアークエネルギーのレベル及びアーク放電の影響に係る技術的知見を得ることを目的として、HEAF 試験を実施した。

本 HEAF 試験で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 各種電気盤 (配電盤、モータコントロールセンタ及び高圧電源盤) の HEAF 試験において、アーク放電の発生、アーク放電の漏えい、金属ヒューム等の発生及びアーク火災発生に係る事象進展を把握した。
- (2) 本 HEAF 試験では、電気盤が異なってもアークエネルギーとアーク放電の継続時間との間に比例関係が認められ、アークパワーがほぼ一定になった。アークパワーが一定になる理由としては、アークジェットのエネルギー密度が本 HEAF 試験条件によってあまり変化しない状態にあり、また流速と断面積 (直径) が反比例の関係になっているためであると推測される。
- (3) アーク火災の発生に必要なアークエネルギー値の目安を得た。本 HEAF 試験で用いた配電盤の場合、火災が発生するアークエネルギーの値は 26.3~28.6MJ の間に存在した。また、本 HEAF 試験で用いた高圧電源盤の場合、火災が発生するアークエネルギーの値は 42.6~57.2MJ の間に存在した。アーク火災の発生に必要なエネルギーは各電気盤内の空間容積の大小や閉じ込め性の高低と関係するものと考えられる。
- (4) 一般火災に対する ZOI 境界線上で測定した各電気盤の最大熱流束の測定結果は、38~107kW/m<sup>2</sup> でありアークエネルギーと相関がある。この値はアーク放電が継続していた間に測定されたものの、NUREG/CR-6850<sup>(参3)</sup> に示される一般火災の損傷基準と比較すると、非常に高い値である。HEAF 事象による影響に関しては、ケーブルの損傷に対する熱流束の基準値や ZOI が別途必要であると考えられる。

今後取り組むべきこととして、以下の研究課題がある。

- (1) HEAF 事象は、急激にエネルギーを放出し、そこに存在する金属導体を急激に蒸発させ、周辺機器を破損させることが試験により確認された。したがって、事象を評価するには電氣的な発生エネルギーに加えて、金属の急激な温度上昇に伴う酸化エネルギー及び機械的なエネルギーも評価する必要がある。
- (2) HEAF 事象については、本 HEAF 試験で様々な知見が得られたが、そのメカニズムやアークの評価モデル等、まだ解明・検討すべき事柄が残されていることから、OECD/NEA で実施している HEAF 試験の結果も加えた継続的な評価が必要である。

## 参考文献一覧

- (参 1) “Metalclad switchgear failures and consequent losses of offsite power”, U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) Information Notice 2002-01, January 8, 2002
- (参 2) 「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」、平成25年10月24日原規技発第1310241号 原子力規制委員会決定
- (参 3) EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities (NUREG/CR-6850, EPRI 1011989), September 2005
- (参 4) 日本原子力学会「2013年秋の大会」2013年9月3日(火)～5日(木) G51原子力施設火災防護対策の高度化(10); 配電盤を用いた高エネルギーアーク事象の評価
- (参 5) 日本原子力学会「2014年春の年会」2014年3月26日(水)～28日(金) G51原子力施設火災防護対策の高度化(12); モーターコントロールセンタを用いた高エネルギーアーク事象の評価
- (参 6) 独立行政法人原子力安全基盤機構(JNES) 安全研究年報(平成24年度)  
V. 3, ①火災防護対策の高度化に係る調査・試験
- (参 7) 「東北地方太平洋沖地震及びその後に発生した津波に関する女川原子力発電所の状況について」平成23年5月 東北電力株式会社  
(<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/9483636/www.nsr.go.jp/archive/nisa/earthquake/files/houkoku230530-2.pdf>)
- (参 8) OECD / Nuclear Energy Agency (NEA), Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI), OECD FIRE Project - TOPICAL REPORT No. 1, “Analysis of High Energy Arcing Fault (HEAF) Fire Events”, NEA/CSNI/R(2013)6, June 2013
- (参 9) 「【東日本大震災関連】タービン建屋地下1階高圧電源盤火災」、原子力施設情報公開ライブラリー(NUCIA) 通番11314、報告書番号2010-東北-M011 Rev.4
- (参 10) IEEE C37.20.7-2007 (IEEE Guide for Testing Metal-Enclosed Switchgear Rated Up to 38 kV for Internal Arcing Faults)
- (参 11) 50kA級長ギャップ交流大電流アークにおけるアークジェット部の温度特性(その2) - 鉄電極から噴出するアークジェットの温度とエネルギー密度

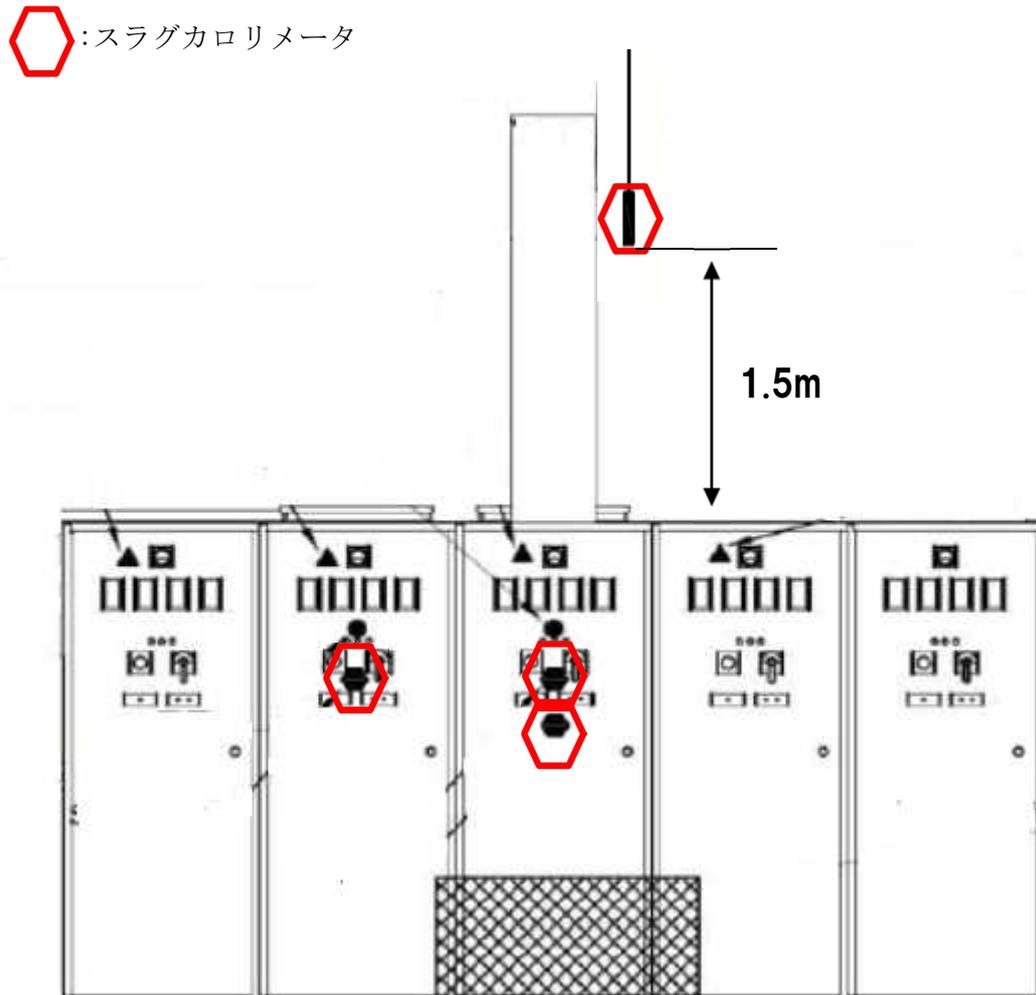
－ (W00026)、電力中央研究所報告、平成13年4月

(参1 2) 50kA級長ギャップ交流大電流アークにおけるアークジェット部の温度特性(その3)－温度およびエネルギー密度の軸方向分布－(W01010)、電力中央研究所報告、平成14年4月

(参1 3) 大気中大電流アークジェットの流速特性(その2)－鉄およびアルミニウム電極から噴出する50kA級アークジェットの流速－(W01021)、電力中央研究所報告、平成14年4月

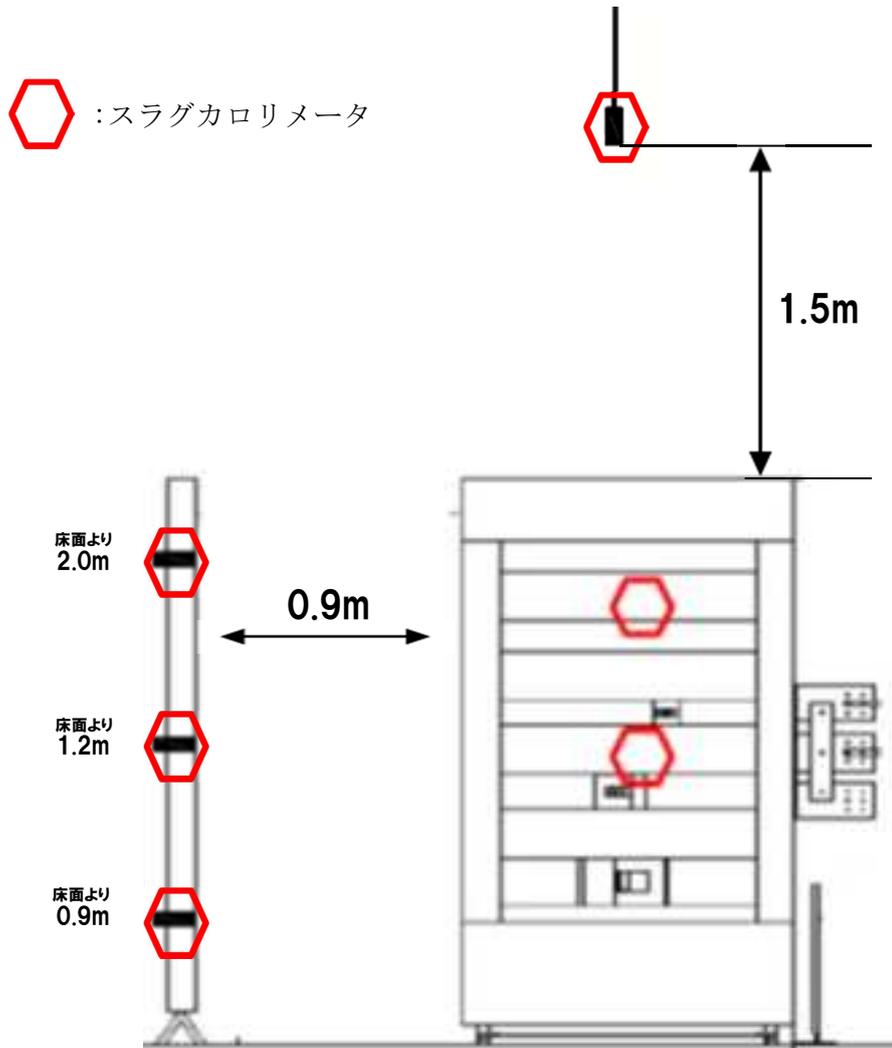
# 付録 1

## 高圧電源盤におけるスラグカロリメータの測定位置



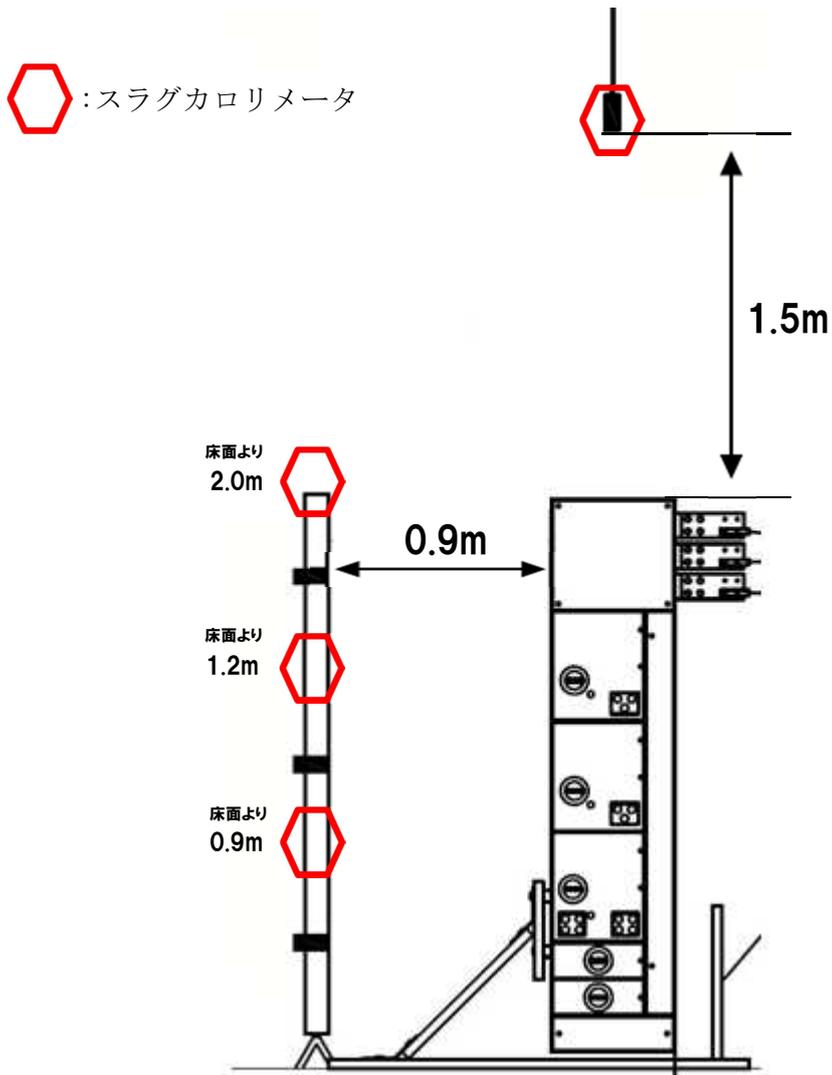
## 付録 2

配電盤におけるスラグカロリメータの測定位置



# 付録 3

モータコントロールセンタにおけるスラグカロリメータの測定位置

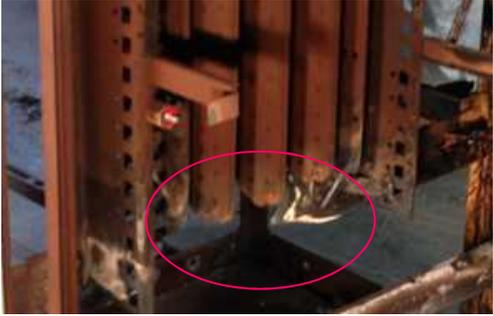


付録 4

HEAF 試験後の高圧電源盤 (試験 2)

	
<p>高圧電源盤正面</p>	<p>高圧電源盤 (正面ドア開)</p>
	
<p>一次側垂直母線の破損 (アーク発生箇所)</p>	<p>火災後の垂直ダクト内ケーブル</p>
	<p>アークエネルギー : 58.2MJ 盤内の最大圧力 : 18.6kPa</p>
<p>損傷した遮断器</p>	

HEAF 試験後の配電盤 (試験 1)

	
<p>配電盤正面</p>	<p>配電盤右後方</p>
	
<p>配電盤上部</p>	<p>火災後の盤内ケーブル</p>
	<p>アークエネルギー : 28.6MJ 盤内の最大圧力 : 26.2kPa</p>
<p>破損した垂直母線 (アーク発生箇所)</p>	

## 付録 6

### HEAF 試験後のモータコントロールセンタ (試験 2)

	
<p>モータコントロールセンタ正面</p>	<p>モータコントロールセンタ (ドア開)</p>
	
<p>上部側面の破損</p>	<p>破損した上部水平母線</p>
	<p>アークエネルギー：17.4MJ 盤内の最大圧力：41.4kPa</p>
<p>破損した垂直母線 (アーク発生箇所)</p>	

「原子力発電所における高エネルギーアーク損傷（HEAF）に関する分析」の執筆者

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ  
安全技術管理官（システム安全担当）付  
椛島 一 主任技術研究調査官  
土野 進 技術参与