

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(第二報)

Analysis of High Energy Arcing Fault (HEAF)
at Nuclear Power Plants (Second Report)

梶島 一

KABASHIMA Hajime

システム安全研究部門

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

令和7年3月

March 2025

本報告は、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等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、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告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 システム安全研究部門
〒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 (第二報)

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ
システム安全研究部門
梶島 一

要 旨

高エネルギーアーク損傷 (HEAF: High Energy Arcing Fault、以下「HEAF」という。) には、第一段階における爆発現象と第二段階におけるアーク火災がある。第二段階におけるアーク火災への対応については、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。)等の試験研究を基に、平成 29 年 7 月 19 日の第 25 回原子力規制委員会において、アーク火災の発生防止に関する規則等の改正と「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」の新規制定が決定され、同年 8 月 8 日付けで施行された。第一段階における爆発現象への対応については、引き続き試験研究や調査を行い、新たな知見が得られた場合は、必要に応じて、更なる規制基準への反映を検討することとされた (第 62 回原子力規制委員会 (平成 29 年 2 月 22 日))。

これを受けて、S/NRA/R では、安全研究プロジェクトにおいて、第一段階における HEAF の爆発現象の解明及び評価のために実電気盤を模擬した試験体を用いてアーク放電試験を行った。その結果、HEAF の爆発圧力の発生としては、2 つの過程が存在することが分かった。高速度カメラ等の解析結果から、初期の圧力スパイクが主に空気の熱膨張であり、その後の安定な圧力が金属蒸気の発生によるものであることが示唆された。また、得られた知見から HEAF の爆発現象に関するアーク放電発生から金属蒸気の放出や酸化までの事象進展を推定した。

本 NRA 技術報告では、これら HEAF の爆発現象に係る研究成果や隣接機器への影響を評価する上で重要な HEAF の影響範囲 (ZOI) の分析結果等について報告する。

Analysis of High Energy Arcing Fault (HEAF)
at Nuclear Power Plants (Second Report)

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

Abstract

High Energy Arcing Fault (hereinafter referred to as "HEAF") consists of an explosion phenomenon in the first phase and an arc fire in the second phase. Regarding the response to arc fire in the second phase, based on the knowledge obtained by the test results by the Regulatory Standard and Research Department in the Secretariat of the Nuclear Regulation Authority (hereinafter referred to as "S/NRA/R") etc., the 25th Nuclear Regulation Authority Meeting (July 19, 2017) decided to amend the regulations regarding the prevention of arc fire and to establish a new review guide for electrical cabinets design related to HEAF, which was promulgated (enacted) on August 8, 2017. On the other hand, regarding the response to the explosion phenomenon in the first phase, safety research and investigation will continue. New findings obtained will be considered for inclusion in further regulatory standards as necessary (62nd Nuclear Regulation Authority Meeting, February 22, 2017).

Under these circumstances, the S/NRA/R conducted a test research project to understand and evaluate the HEAF explosion phenomenon in the first phase using the test box to simulate an actual electrical cabinet. As a result, two types of pressure rise were identified: pressure spike and successive stable rise of low pressure. The pressure spike was observed in the initial stages of the explosion and its cause was judged to be rapid air heating due to heat transfer from the arc discharge. On the other hand, the successive stable rise of low pressure was observed after the pressure spike and it was suggested that it be maintained by the build-up of metal vapor generated from the bus bar by the heat of arc discharge. Furthermore, the progression of HEAF explosion phenomena was inferred from the obtained findings.

This NRA Technical Report presents the research results on the explosion phenomenon of HEAF and the analysis results of the zone of influence (ZOI) of HEAF, which is important for evaluating the influence on adjacent equipment.

目 次

1. はじめに	1
2. HEAF 試験研究	3
2.1 HEAF 試験の目的	3
2.2 HEAF 試験の概要	3
2.3 HEAF 試験の結果及び考察	5
2.3.1 HEAF の爆発圧力及び爆発メカニズム	5
2.3.2 HEAF の爆発圧力に及ぼす試験体の内容積の影響	7
2.3.3 HEAF の爆発圧力に及ぼす試験体の開口部の影響	8
2.3.4 HEAF の爆発圧力のまとめ	9
2.3.5 HEAF の爆発現象に係る事象進展に関する考察	10
2.3.6 HEAF の爆発現象に係る評価	11
2.3.7 アーク火災発生防止に係るアークエネルギーのしきい値及び金属母線の損耗 量	12
2.3.8 アークエネルギーの増加による銅母線の損耗量の増大	14
2.3.9 HEAF の爆発現象における熱影響の評価の考え方	15
2.4 HEAF 試験研究のまとめ	17
3. HEAF の影響範囲 (ZOI) に関する分析	18
3.1 HEAF の爆発現象に対する ZOI 評価における基本的な考え方	18
3.2 HEAF の影響を受ける設備に係る米国の損傷基準	19
3.3 25 MJ 以下のアークエネルギーにおける HEAF の爆発現象に対する ZOI の推定例	20
3.3.1 アーク放電に起因する輻射熱に基づく ZOI の推定	21
3.3.2 アーク放電に起因する輻射熱に金属蒸気の酸化熱を加えた条件に基づく ZOI の 推定	22
3.3.3 HEAF 審査ガイド及び米国における HEAF の ZOI	24
3.4 HEAF の ZOI に関する分析のまとめ	25
4. おわりに	26
謝辞	27
参考文献一覧	28
付録 A. HEAF 試験情報及び試験データ	32
A.1 米国 KEMA 試験場	32
A.2 米国 KEMA 試験場のテストセル	33

A.3	短絡電流値の算出方法	34
A.4	HEAF 試験に用いた電気回路	35
A.5	基準試験体の立面図	36
A.6	内容積の異なる 5 つの試験体（図 2.5）の写真	37
A.7	上部開口部の異なる試験体（図 2.7）の写真	38
A.8	銅母線及びアルミニウム母線の写真	39
A.9	測定項目	40
A.10	電圧・電流波形等の一例	41
A.11	試験データ一覧	42
	付録 A：参考文献一覧	44
付録 B.	HEAF に関する規制情報等	45
B.1	HEAF の規制化の経緯	45
B.2	事業者との面談	46
B.3	OECD/NEA HEAF プロジェクト	48
B.4	米国 NRC の HEAF 研究	49
	付録 B：参考文献一覧	50
執筆者一覧		57

表 目 次

表 2.1	実電気盤の HEAF 試験における爆発圧力（ゲージ圧）等	11
表 2.2	各電気盤のアーク火災発生防止のアークエネルギーのしきい値	12
表 2.3	アークエネルギーと銅母線の損耗量との関係.....	14
表 3.1	HEAF に係る損傷基準.....	19

図 目 次

図 1.1	電気盤における高エネルギーアーク損傷 (HEAF)	1
図 2.1	基準試験体.....	4
図 2.2	図 2.1 に示す基準試験体を用いた HEAF 試験の一例	4
図 2.3	図 2.1 に示す銅母線の基準試験体 (0.583m ³) を用いた爆発圧力の一例.....	5
図 2.4	各爆発圧力 (図 2.3 (a)~(f)) における高速度カメラの映像	6
図 2.5	内容積の異なる 5 つの試験体	7
図 2.6	試験体内圧力に対する試験体内容積の影響 (銅母線の場合)	7
図 2.7	上部開口部の異なる試験体	8
図 2.8	上部開口部が試験体内圧力に及ぼす影響 (銅母線の場合)	8
図 2.9	試験体内外における HEAF の事象進展の推定図	10
図 2.10	金属母線の損耗量とアークエネルギーとの関係.....	13
図 2.11	試験体内において発生した金属蒸気が壁面に付着した痕跡	15
図 3.1	銅及びアルミニウムの酸化還元エネルギー	22

略 語 表

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)
KEMA	Keuring van Elektrotechnische Materialen te Arnhem (オランダ電気機器規格協会)
M/C	Metalclad Switchgear (高圧電源盤)
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)
TP	Thermoplastic (熱可塑性)
TS	Thermoset (熱硬化性)
ZOI	Zone of influence (影響範囲)

用語の定義

高エネルギー	遮断器や開閉器などの通電された導体間、又は通電された部品とアースの間に大電流のアーカ放電が発生し、熱、光、金属の蒸発及び圧力の上昇を伴って、急激なエネルギーの放出が起こる事象として特徴付けられる爆発性の電気故障。HEAF の第一段階では、爆発現象により機器の損壊、変形等の故障が発生する場合がある。
アーカ損傷 (HEAF)	また、アーカ放電に起因する熱の影響により、HEAF の第二段階では、アーカ火災が発生する場合がある。
アーカ放電	電極間に電位差が生じることにより、電極間にある気体に持続的に発生する放電の一種。電極間にある気体は励起状態になり、高温と閃光を伴う。
アーカパワー	アーカ放電発生時の電圧値 (V) と短絡電流値 (A) を乗じた三相の合計値。単位は、ワット (W) である。
アーカエネルギー	アーカパワー (W) にアーカ放電の継続時間 (s) を乗じた三相の積算値。単位は、ジュール (J) である。
アーカ火災	アーカ放電の継続により、電気盤や隣接する電気設備等に発生する火災。火災は、アーカ放電の熱による電気盤内等の温度上昇、ケーブル等からの可燃性ガスの発生及び可燃性ガスの引火等を経て発生する。
金属ヒューム	加熱による金属の酸化や昇華によって生じる金属の微粉、煙霧、蒸気及び揮発性の粒子。
電気盤	電力を供給するための機器を組み込んだ盤。実用発電用原子炉施設に設置されている高圧電源盤（直流にあっては 750 ボルトを、交流にあっては 600 ボルトを超え、7000 ボルト以下のもの）であって、大容量の負荷及びパワーセンタ等に電力を供給するもの。メタルクラッドスイッチギヤ等をいう。）及び低圧電源盤（直流にあっては 750 ボルト以下、交流にあっては 600 ボルト以下のもの。パワーセンタとモーターコントロールセンタの 2 種類がある。）。

1. はじめに

高エネルギーアーク損傷（HEAF: High Energy Arcing Fault、以下「HEAF」という。）とは、短絡により遮断器や開閉器などの通電された導体間又は通電された部品とアースの間に大電流のアーク放電が発生し、熱、光、金属の蒸発及び圧力の上昇を伴って、急激なエネルギーの放出が起こる事象として特徴付けられる爆発性の電気故障である¹⁻⁸。

図 1.1 に示すように HEAF には、第一段階における爆発現象と第二段階におけるアーク火災がある²⁻⁸。HEAF の第一段階では、爆発現象により機器の破壊、変形、給電機器のトリップ等が起こることに加え、破壊された部品の飛び散りなどが発生する場合がある。HEAF の第二段階では、アーク放電に起因する熱の影響により機器等が高温になり火災等が発生する場合がある。アーク火災が発生した場合には、電気ケーブルや機器への損傷が拡大し、機器の停止・誤作動・制御不能などをもたらす可能性がある。

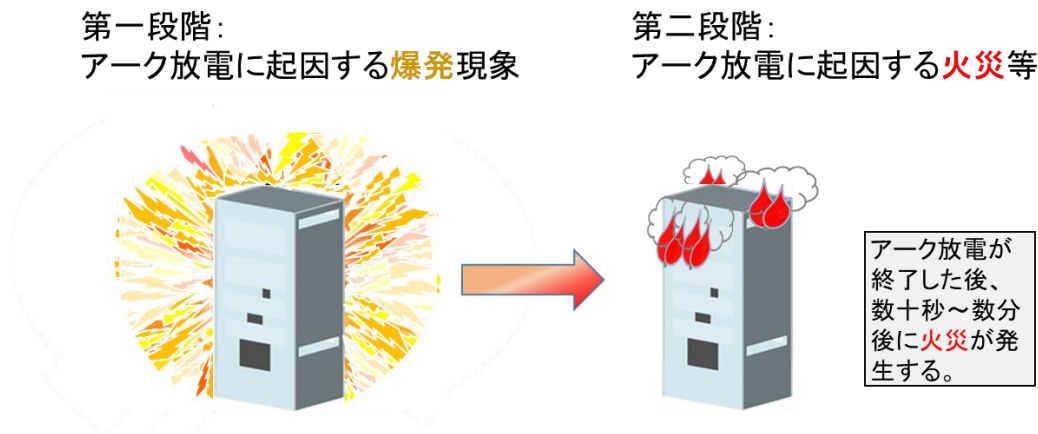


図 1.1 電気盤における高エネルギーアーク損傷（HEAF）

Fig. 1.1 High energy arcing fault (HEAF) in electrical cabinet

経済協力開発機構/原子力機関（以下「OECD/NEA」という。）FIRE プロジェクトによれば、1975～2012 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 による火災であったとしている²。日本の代表的な HEAF 事象としては、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。）にて発生した高圧電源盤火災がある^{2,4,5,9,10}。この女川 1 号機の HEAF 事象ではアーク火災の影響により、隣接する電気盤等が延焼するなどして多くの電気ケーブルや機器等が損傷した。

HEAF の第二段階におけるアーク火災への対応については、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。）^{4,5,7,11-17}、OECD/NEA HEAF プロジェクト⁶等の試験研究を基にアーク火災の発生メカニズムの解明等が進んだことで、平成 29 年 7 月 19 日の第 25 回原子力規制委員会において、アーク火災の発生防止に関する規則等の改正¹⁸と「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「HEAF 審査ガイド」という。）」¹⁹の新規制定が決定され、同年 8 月 8 日付けで施行された。これ

らは、電気盤における遮断器の遮断時間の調整等によりアーク放電の継続時間を短縮することで、爆発の影響を減少させ、故障による影響をより局所化するとともに、アーク放電に伴う発熱によるアーク火災を防止することを目的としている。ただし、知見が十分ではなかった HEAF の第一段階における爆発現象への対応については、引き続き試験研究や調査を行い、その影響範囲（ZOI：Zone of influence、以下「ZOI」という。）について、新たな知見が得られた場合には、必要に応じて更なる規制基準への反映を検討することとされた（第 62 回原子力規制委員会（平成 29 年 2 月 22 日））²⁰。

上述の背景及び経緯を踏まえて、S/NRA/R では、安全研究プロジェクト「火災防護に係る影響評価に関する研究（H29-R2）」²¹ 及び「火災防護に係る影響評価に関する研究（フェーズ 2）（R3-R6）」²² において、HEAF の第一段階における爆発現象の解明及び評価のための試験研究等を行った^{23,24}。

本 NRA 技術報告では、S/NRA/R が試験研究を実施した HEAF の第一段階における爆発現象に関するアーク放電発生から金属蒸気の放出や酸化までの事象進展について報告する。また、HEAF の第一段階における爆発現象の圧力や熱等に関する研究成果を踏まえて、隣接機器等への影響が懸念される HEAF の ZOI の分析結果等について報告する。なお、HEAF の概略、女川 1 号機での HEAF 事象、過去に原子力規制庁が実施した HEAF 試験等については、前報の NRA 技術報告（NTEC-2016-1002）「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」⁴において平成 28 年 3 月に公表している。そのため、前報と重複する内容については、記載を省略するか、又は付録に概要を記すに留めた。

以下に各章の概要を示す。

第 2 章においては、S/NRA/R で実施した実電気盤を模擬した試験体の HEAF 試験研究の概要に加えて主要な試験結果及び考察について記載した。

第 3 章においては、第 2 章の研究成果を踏まえて HEAF の ZOI に関する分析を行うとともに、米国の損傷基準を用いて我が国のアーク火災発生防止対策済みの HEAF 発生条件（アークエネルギー：25 MJ 以下）における ZOI を推定した。

付録 A においては、S/NRA/R が米国ペンシルベニア州にあるオランダ電気機器規格協会の High Power and High Voltage Test Facility（以下「米国 KEMA 試験場」という。）にて実施した HEAF 試験の詳細情報及び試験データを記載した。

付録 B においては、HEAF に関する規制情報等の整理を目的として、日本における HEAF の規制化の経緯及び事業者との面談の来歴並びに OECD/NEA HEAF プロジェクト及び米国原子力規制委員会（以下「米国 NRC」という。）の HEAF 研究の情報入手先を記載した。

2. HEAF 試験研究

2.1 HEAF 試験の目的

本 HEAF 試験の目的は、HEAF の第一段階における爆発現象の圧力や熱等に関する知見を取得することである。本爆発現象に対して圧力や熱等に大きな影響を及ぼす要因としては、空気の熱膨張と金属蒸気・金属ヒュームの発生等が考えられ、それらを定量的に測定できるように、実電気盤を模擬した試験体を用いて HEAF 試験を行い、爆発圧力、金属蒸気・金属ヒュームの噴出量等に関するデータ・映像等を取得した。なお本試験の解析では、保守的な酸化熱を算出するため、金属ヒュームを金属蒸気として取り扱った。

2.2 HEAF 試験の概要^{5,21}

本 HEAF 試験は、大電流対応の発電機を有する米国 KEMA 試験場で実施した^{5,23}。また、本 HEAF 試験における熱流束の計測等については、二国間協定に基づき米国 NRC からの協力を得た。

本 HEAF 試験で基準となる試験体（以下「基準試験体」という。）の模式図等を図 2.1 に示す。基準試験体を含め全ての試験体は、火災が発生しないように難燃又は不燃材（外側：ガラス繊維強化樹脂板、内側：セメント板）を用いて作製した。基準試験体の内容積は、過去に S/NRA/R で行った高圧電源盤の HEAF 試験⁵と同じ体積（0.583 m³）にした。また、様々な電気盤にも対応できるように上記内容積を 0.25～2 倍にした試験体も作製した。

全ての試験体内にはアーク放電を発生させるための銅母線又はアルミニウム母線と鋼製プレートの接地極を取り付けた（図 2.1）。さらに、試験体の上部には母線ダクトを模擬した開口部（0.0579 m²）を取り付けた。なお、基準試験体における開口面積率（開口面積／試験体の表面積×100）は約 1.4 %であり、一般的な電気盤の開口面積率より小さい。これは、保守的な仮定で爆発圧力を測定できるように設計したためである。

HEAF 試験では、試験体にアーク放電を発生させる電流の目標値として、実際の電気盤での短絡時に想定される電流値（以下「短絡電流値」という）を設定する必要がある。短絡電流値は、原子力発電所においては各電気盤の上流側の変圧器のインピーダンスと二次側定格電流によって決まる。本 HEAF 試験では、過去に HEAF によってアーク火災を起こした女川 1 号機の高圧電源盤の設定値とほぼ同等となるように短絡電流値を 23 kA に、初期電圧値を 7 kV に設定した⁴。

本 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（電力供給側）で測定したアーク放電発生時の電圧値（V）と短絡電流値（A）を乗じたアークパワー（W）をアーク放電の継続時間（s）で積算した値とした。なお、米国電気電子学会（IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers）の金属密閉型電源盤試験規格 C37.20.7-2007²⁵に基づき、金属母線間を導電性針金で結束（以下「ワイヤリング」という。）した状態で大電流を流すことにより短絡を模擬してアーク放電を発生させた。

HEAF の爆発現象を評価するために、高速度カメラ等による本 HEAF 試験映像の撮影及

び試験体内の爆発圧力、試験体外における熱流束等の計測等を行った（表 A.1）。

図 2.1 の基準試験体を用いた本 HEAF 試験の一例を図 2.2 に示す。図 2.2 に示すように本 HEAF 試験では、基準試験体内で発生するアーク放電による熱の影響により、金属母線が溶融・蒸発して、試験体上部の開口部（ベント）から金属蒸気が噴出^{5,23}するが、基準試験体内にケーブル等の可燃物が存在しない仕様としているため、アーク火災は発生しない。

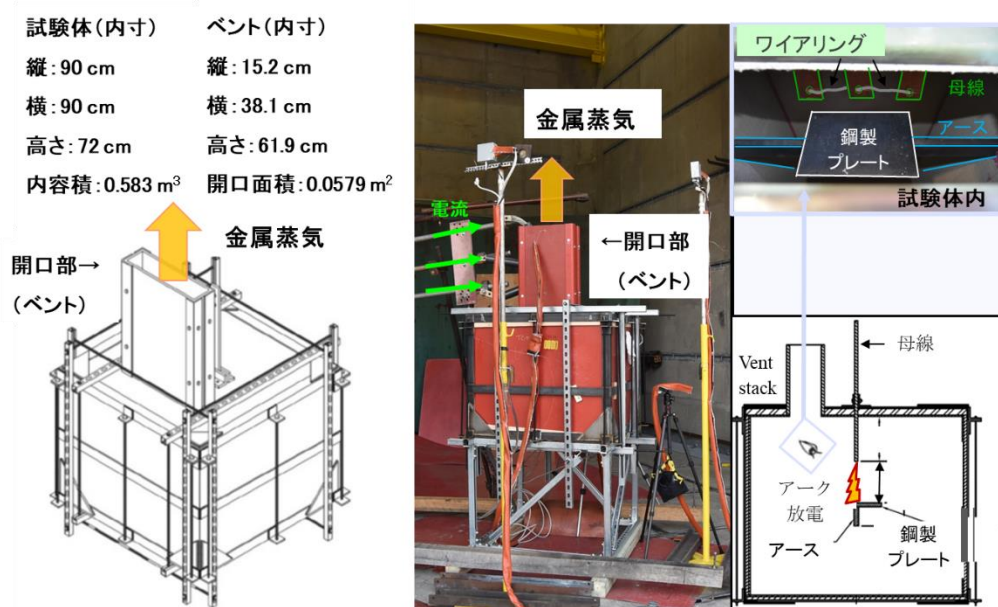


図 2.1 基準試験体

Fig. 2.1 Reference test box



図 2.2 図 2.1 に示す基準試験体を用いた HEAF 試験の一例

Fig. 2.2 An example of HEAF test using reference test box shown in Fig. 2.1

2.3 HEAF 試験の結果及び考察

2.3.1 HEAF の爆発圧力及び爆発メカニズム²¹

原子力発電所における実電気盤を模擬した試験体内において、初期電圧値 7 kV、短絡電流値 23 kV 及び所定の短絡時間を設定してアーク放電を発生させ HEAF 試験を行った。本 HEAF 試験では、いずれの試験条件においても試験体内の初期の圧力が急激に上昇し、開口部から空気及び金属蒸気が噴出した^{5,23}。そのため、本試験ではアーク放電が発生している間の試験体内の圧力等を連続的に計測して HEAF の爆発現象を評価した。

図 2.1 の基準試験体内で実機を模擬した銅母線と鋼製プレートの接地極の間にアーク放電を 2 秒間発生させた場合の、アーク放電時間に対する試験体内の圧力変化の一例を図 2.3 に示す。図に示すように HEAF の爆発圧力変化は、試験開始直後の①圧カスパイク(b)～(e)とその後の②安定な圧力(f)の 2 段階に分けられることが分かった。圧カスパイクにおけるピーク値は約 180 kPa (ゲージ圧) に達した。一方、圧カスパイク後に圧力が安定する期間の圧力は約 5.5 kPa (ゲージ圧) であった。

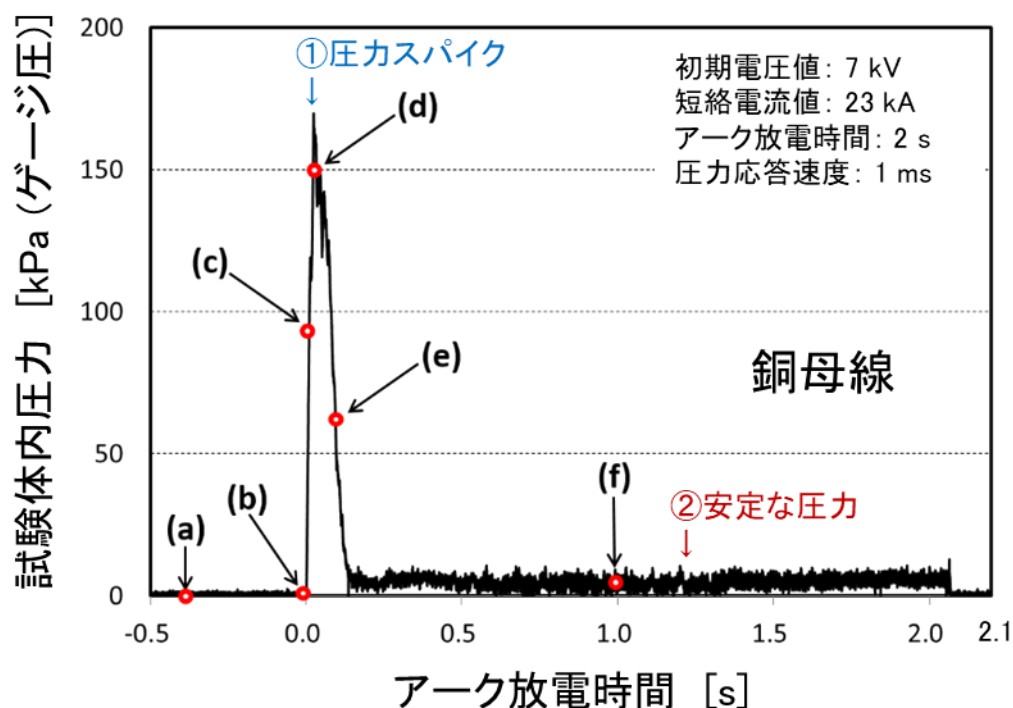


図 2.3 図 2.1 に示す銅母線の基準試験体 (0.583 m³) を用いた爆発圧力の一例

(a) 試験前、(b) 0.000 秒 (0 kPa)、(c) 0.009 秒 (88.9 kPa)、
(d) 0.021 秒 (149.1 kPa)、(e) 0.093 秒 (64.7 kPa)、(f) 1.000 秒 (5.5 kPa)

Fig. 2.3 An example of explosion pressure using reference test box (0.583 m³) of copper bus bar shown in Fig. 2.1

(a) Before test, (b) 0.000 s (0 kPa), (c) 0.009 s (88.9 kPa),
(d) 0.021 s (149.1 kPa), (e) 0.093 s (64.7 kPa), (f) 1.000 s (5.5 kPa)

図 2.4 には、図 2.3 の各点(a)～(f)における高速度カメラの映像を示す。既に述べたように試験体内には可燃物が存在しないことから、試験体内で起こる主な現象は、アーク放電に伴う母線の過熱及び溶融と金属蒸気発生並びにそれに伴う空気の膨張と予想される。試験開始後 0.009 s となる(c)点では、急激に圧力が上昇しているが、まだ、開口部からの金属蒸気の噴出は認められない。この時点での急激な圧力上昇は、試験体内の空気がアーク放電の熱によって急激に熱膨張したためと考えられる。試験開始後 0.021 s となる(d)点では、最大圧力値付近に達している(図 2.3)が金属蒸気の噴出は少ないため、試験体内に残存している空気の熱膨張に加え金属蒸気の発生が圧力上昇の要因になっていると考えられる。最大圧力値付近に到達した後 0.07 s 程度経過した(e)点では、大量の金属蒸気の噴出が認められる。この時点で既に試験体内の圧力が下降しているのは、試験体内の空気が既に放出されているためと考えられる。(f)点では、金属蒸気の噴出が継続しているが圧力は低い値で安定している。これは、試験体内での金属蒸気の発生と開口部からの噴出が平衡になっているためであると考えられる。したがって、図 2.3 の圧力スパイクは主に空気の熱膨張によるもの、また、その後の安定な圧力は金属蒸気の発生によるものであることが映像解析の結果から示唆された。また、本 HEAF 試験の衝撃解析コード (ANSYS AUTODYN) による解析結果からも、圧力スパイクの要因は、本映像解析結果と同様に主に空気の熱膨張であることが示唆された^{21,24}。

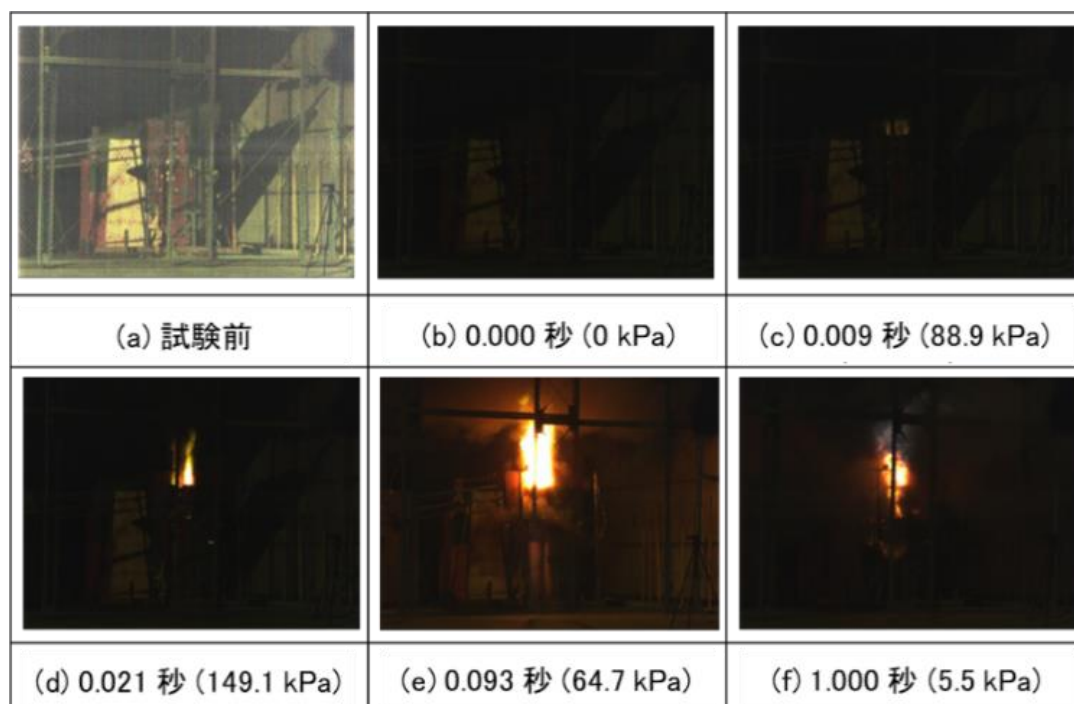


図 2.4 各爆発圧力 (図 2.3 (a)～(f)) における高速度カメラの映像

Fig. 2.4 High-speed camera images at each explosion pressure ((a) to (f) in Fig. 2.3)

2.3.2 HEAF の爆発圧力に及ぼす試験体の内容積の影響²¹

原子力発電所では様々な大きさの電気盤が使用されているため、HEAF の爆発圧力に及ぼす試験体の内容積の影響について検討した。図 2.5 には、図 2.1 に示す基準試験体の内容積を 1 として、内容積を 0.25～2 倍に変えた試験体の模式図を示す。図 2.6 に、本試験で得られた試験体内圧力（圧力スパイクのピーク値）と内容積比の関係を示す。この図に見られるように、内容積以外が同一条件（初期電圧値 7 kV、短絡電流値 23 kA、開口面積 0.0579 m²）の場合は、内容積が小さいほど圧力が大きくなる傾向が認められた。基準試験体の内容積を 0.25 倍にした試験体内圧力の最大値は、約 230 kPa（ゲージ圧）であった。これは、試験体内の空気量が少ないほど空気の温度上昇が急激になるためであると考えられる。

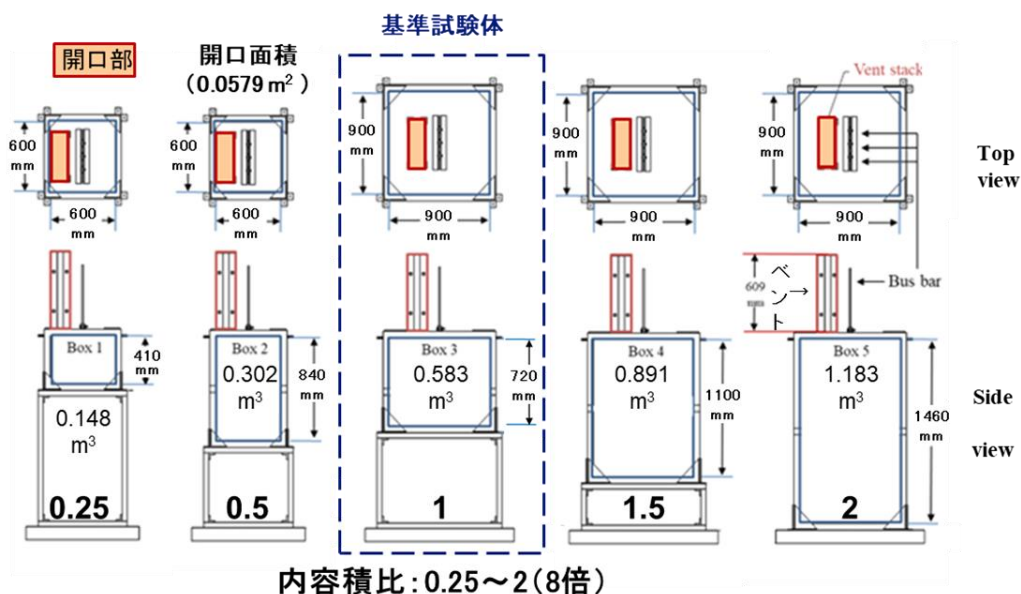


図 2.5 内容積の異なる 5 つの試験体

Fig. 2.5 Five test boxes with different internal volumes

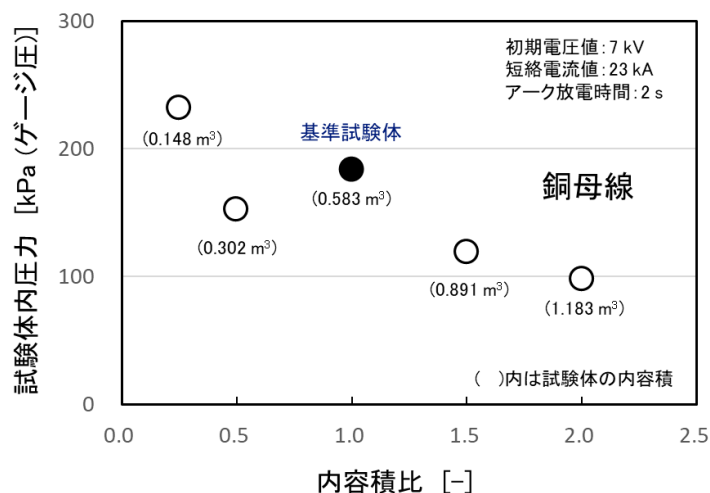


図 2.6 試験体内圧力に対する試験体内容積の影響（銅母線の場合）

Fig. 2.6 Effect of test box volume on explosion pressure (For copper bus bar)

2.3.3 HEAF の爆発圧力に及ぼす試験体の開口部の影響²¹

原子力発電所で使用されている電気盤の開口部（開口面積、開口数）は様々なため、HEAF の爆発圧力に及ぼす試験体の開口部の影響について検討した。図 2.7 には、図 2.1 に示す基準試験体を用いて、上部開口部の開口面積を図 2.1 の 1～3 倍、開口数を 1～3 個の範囲で変化させた試験体の模式図を示す。また、図 2.8 には、試験で得られた試験体内圧力（圧力スパイクのピーク値）と上部開口面積の関係を示す。図 2.8 に示すように上部開口部以外が同一条件（初期電圧値 7 kV、短絡電流値 23 kA、内容積 0.583 m³）の場合は、開口面積が大きいほど圧力は小さくなる傾向が認められた。これは、試験体内の空気は開口面積が大きいほど噴出しやすいためであると考えられる。また、開口面積を同一とし開口数を 1～3 個の範囲で変化させた場合には、開口数を増やした方が試験体内圧力は小さくなる傾向が認められた。

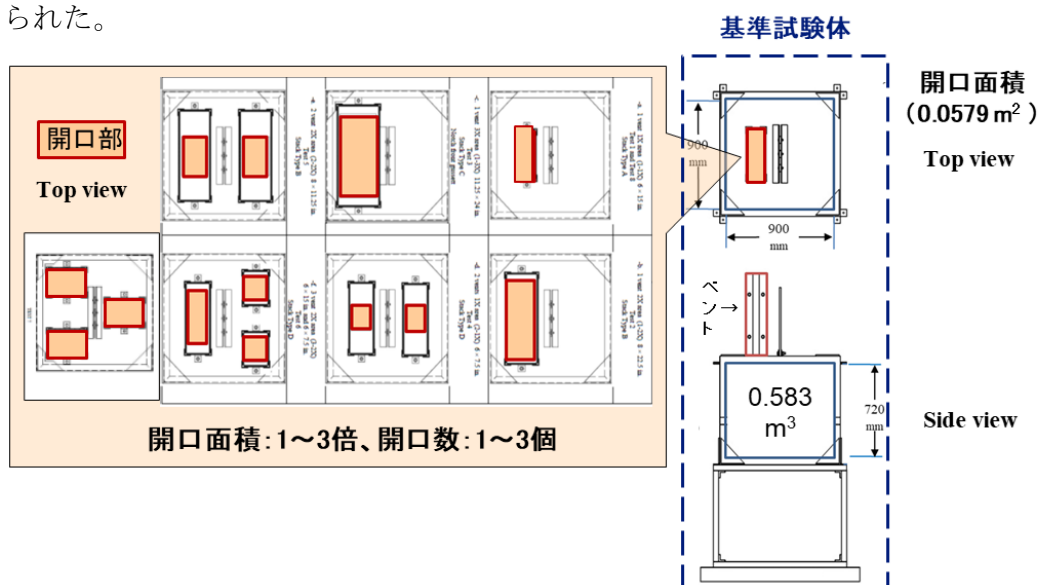


図 2.7 上部開口部の異なる試験体

Fig. 2.7 Test boxes with different top openings

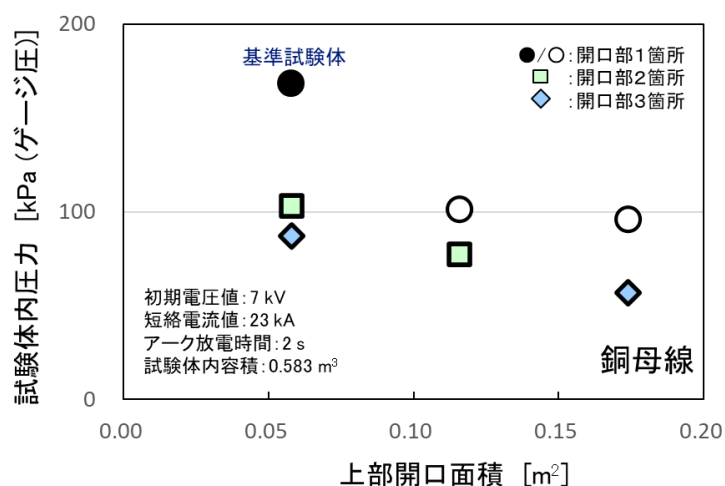


図 2.8 上部開口部が試験体内圧力に及ぼす影響（銅母線の場合）

Fig. 2.8 Effect of top opening on explosion pressure (For copper bus bar)

2.3.4 HEAF の爆発圧力のまとめ

図 2.1 に示す基準試験体における圧力スパイクの最大値は、約 180 kPa（ゲージ圧）であった（図 2.3 及び図 2.6 参照）。また、図 2.1 に示す基準試験体の内容積を 0.25 倍にした試験体の圧力スパイクの最大値は、約 230 kPa（ゲージ圧）であった（図 2.6 参照）。これらの圧力が HEAF の爆発圧力に相当するものの自動車用タイヤの空気圧程度であるため、本試験体で HEAF が発生した場合の爆発力は、タイヤの破裂程度の破壊力であると推定される。

2.3.5 HEAF の爆発現象に係る事象進展に関する考察

試験研究から得られた知見に基づく試験体内外における HEAF の事象進展の推定図を図 2.9 に示す。爆発現象に係る事象進展については、①から⑧の 8 段階に分けて説明する。

①は、試験前の金属母線間を導電性針金でワイヤリングを施した状態を示している。また、試験体内は、空気で満たされている。②は、三相短絡の状態を示している。短絡時には、衝撃により金属母線の一部が欠ける場合がある。③は、空気の絶縁破壊によりアーク放電が発生した直後を示している。この場合、金属母線と鋼製プレートの接地極の間に数万度²¹のアーク放電が発生し、その熱で試験体内の空気が加熱される。④は、高温高压空気噴出の状態を示している。この状態は、図 2.3 の圧力スパイク (b)、(c)、(d) 及び図 2.4 の (b)、(c)、(d) に相当しており、HEAF 時の一つの爆発過程とみなせる。また、アーク放電の熱等により金属母線の温度が上昇する。⑤は、高温空気噴出の状態を示している。この段階で、試験体内の高温空気が金属母線の溶融・蒸発によって発生する金属蒸気によって置換される。また、アーク放電の熱等により金属母線の溶融・蒸発が加速される。⑥は、試験体外に金属蒸気が噴出する状態を示している。母線の材料である銅やアルミニウムが高温の蒸気として空気に接触すると急激に酸化され酸化熱を生じる。しかし、この段階では金属蒸気の噴出量及び酸化量は比較的小さく周囲への熱影響はそれほど大きくないものと考えられる。⑦は、試験体外により多くの金属蒸気が噴出し酸化する状態を示している。この状態では、⑥に比べ金属蒸気の噴出・酸化量が多いため、周囲への熱影響が比較的大きいと推定され、HEAF 時のもう一つの爆発過程とみなせる。また、⑥～⑦推移は、図 2.3 の(c)～(f)に相当する。⑧は、試験後の金属母線の損耗及び鋼製プレートの接地極の損傷の状態を示している。

以上、①から⑧の中で HEAF の爆発現象は、主に④の高温高压空気噴出 (圧力スパイク) 及び⑦の金属蒸気大量噴出・酸化であると推定される。

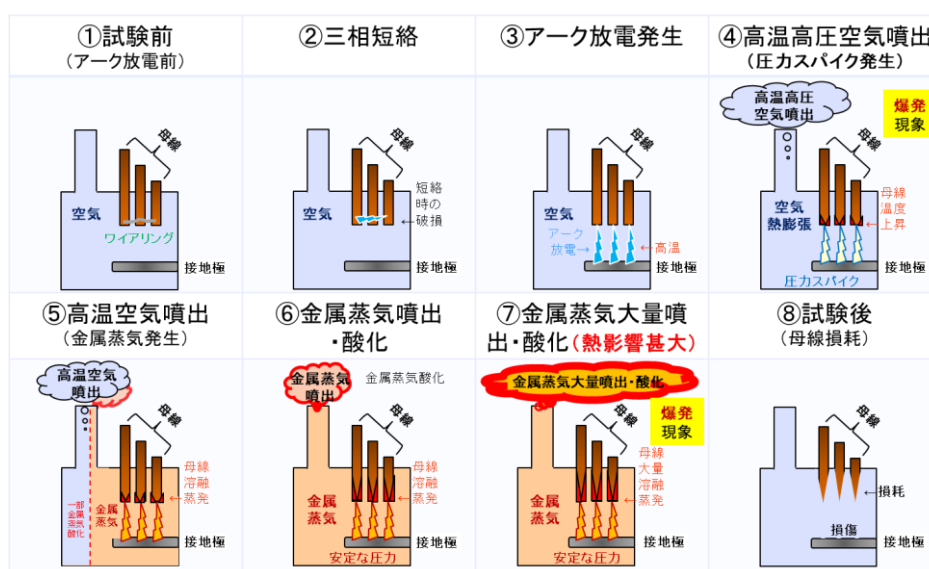


図 2.9 試験体内外における HEAF の事象進展の推定図

Fig. 2.9 Inferred diagram of the progression of HEAF events inside and outside the test box

2.3.6 HEAF の爆発現象に係る評価

HEAF の爆発現象は、図 2.9 の④高温高压空気噴出及び⑦金属蒸気大量噴出・酸化の 2 つの事象に分けられるため、それぞれの事象が試験体外へ及ぼす影響を評価した。

④高温高压空気噴出事象については、試験体内外の圧力の値が重要な評価指標になる。本 HEAF 試験において試験体内の高温高压空気の圧力は、50～230 kPa（ゲージ圧）であるが、試験体内の空気量自体が試験体の内容積によって限定されていて少ないこと、また、噴出した高温高压空気が試験体外に噴出すると直ちに常圧になるため、高温高压空気が試験体外に及ぼす影響は小さいと判断される。表 2.1 に過去に実施した実電気盤の HEAF 試験における盤内の爆発圧力（ゲージ圧）等を示す⁴。同表に示すとおり、実電気盤を用いた HEAF 試験では、盤面に放熱用ルーバー等の開口部が多数存在するため、盤内圧力は、本試験体を用いた HEAF 試験と比較して小さくなっている。したがって、実電気盤における高温高压の空気噴出に係る爆発事象が周囲に及ぼす影響は、更に小さくなる。

⑦金属蒸気大量噴出・酸化事象については、金属蒸気の噴出量及びその温度が重要な評価指標になる。噴出した金属蒸気は、それ自体が持つ熱量に加えて空気中での酸化熱も大きいことから、試験体外に多大な熱影響を及ぼすと考えられる³¹⁻³³。

したがって、HEAF の爆発現象の影響を評価する場合には、⑦の事象での試験体外への影響を支配する金属蒸気の発生量及びその噴出量の見積りが重要になると考えられる。

表 2.1 実電気盤の HEAF 試験における爆発圧力（ゲージ圧）等

Table 2.1 Explosion pressure (gauge pressure) etc. in HEAF test of electrical cabinets

電気盤 項目	高压電源盤	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。

出典) 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⁴

<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11235834/www.nsr.go.jp/data/000145383.pdf>

2.3.7 アーク火災発生防止に係るアークエネルギーのしきい値及び金属母線の損耗量

前述のとおり、HEAFに係るアーク火災の発生防止に関する規則等の改正等¹⁸が施行された。日本の電力事業者は、新規に制定されたHEAF審査ガイド¹⁹を踏まえて、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てアーク火災の発生防止に係るしきい値を決定し、規制対象の各電気盤に対して、短絡等により発生するアークエネルギーがアーク火災の発生防止に係るしきい値よりも小さい値になるように、遮断器の遮断時間等を検討した²⁶⁻²⁸。

表 2.2 に電力事業者が HEAF 試験を実施し設定した異なる種類の電気盤におけるアーク火災発生防止に係るしきい値（全事業者共通）を示す²⁹。同表に示すとおり、アーク火災発生防止に係るしきい値の最大値が高圧電源盤(M/C)について 25 MJ になったことから、アーク火災発生防止対策済みの電気盤においては、HEAF が発生したとしても放出されるアークエネルギーは、25 MJ 以下となる。なお、M/C、P/C、MCC 及び M/C(D/G)では、電気盤の大きさや閉じ込め性（開口率）、短絡電流値等の影響により、アーク火災発生防止に係るしきい値が異なっている。

表 2.2 各電気盤のアーク火災発生防止のアークエネルギーのしきい値

Table 2.2 Arc energy threshold for preventing arc fire on each electrical cabinet

	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

M/C：高圧電源盤、P/C：パワーセンタ、MCC：モーターコントロールセンタ、D/G：非常用ディーゼル発電機

出典) 原子力規制委員会、第 993 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合²⁹

図 2.1 の基準試験体における試験前後の金属母線の重量変化から求めた金属母線の損耗量とアークエネルギーとの関係を図 2.10 に示す。本研究の試験条件である初期電圧値 7 kV、短絡電流値 23 kA の場合（高圧電源盤の短絡条件）、銅母線及びアルミニウム母線ともに、アークエネルギーの増加に従って、金属母線の損耗量は増加した。このことは、各電気盤に設定されているアークエネルギーのしきい値が異なることから、電気盤の種類によって金属母線の損耗量が異なることを示している。

アーク火災発生防止に係るアークエネルギーのしきい値である 25 MJ における、本試験体での金属母線の損耗量は、銅 857 g (13.5 mol)、アルミニウム 595 g (22.1 mol) 程度であった³⁴。このように試験前後の重量変化で比較した損耗量は、銅母線の方が大きい。

アルミニウム母線のサイズ以外がほぼ同一条件の場合は、アルミニウム母線のサイズ(断面積)が大きい高圧電源盤の方(図 2.10 の黒▲)が損耗量は小さい。この理由としては、金属母線のサイズが大きくなるに従って、熱容量も増えるため、アーク放電等の熱による金属母線の温度上昇が抑制されるため金属母線の溶融・蒸発が起きにくくなったことが考えられる。

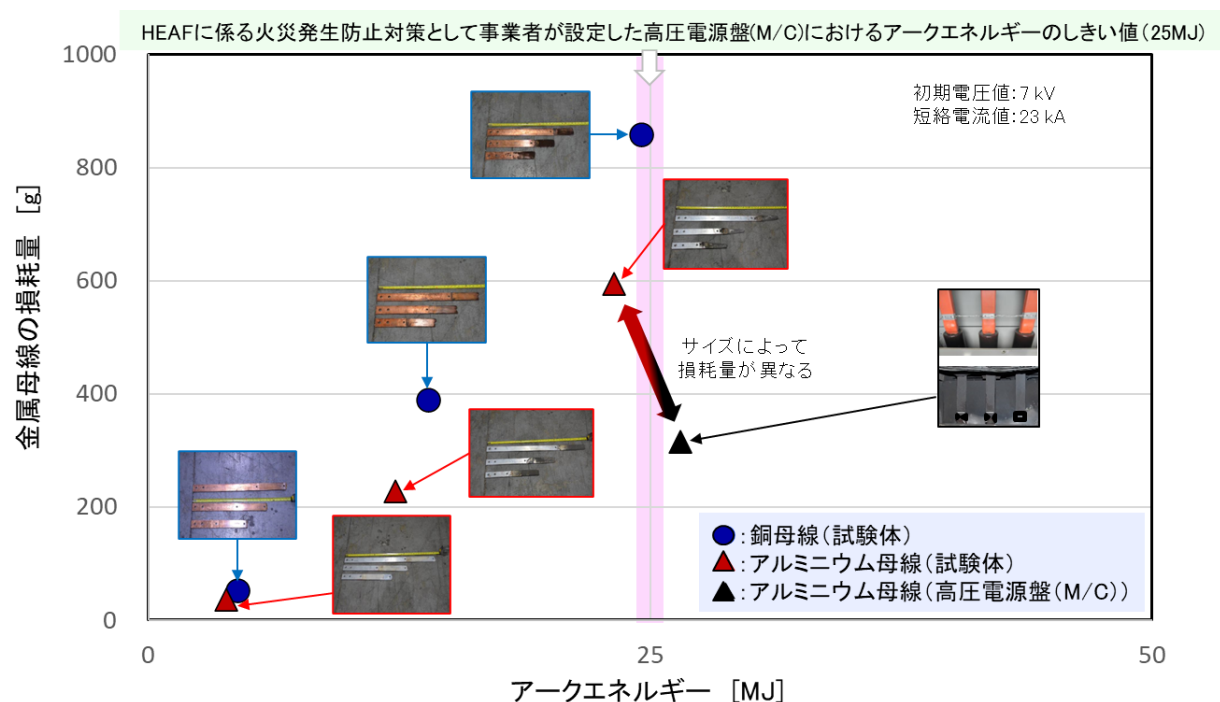


図 2.10 金属母線の損耗量とアークエネルギーとの関係

Fig. 2.10 Relationship between metal bus bar weight loss and arc energy

2.3.8 アークエネルギーの増加による銅母線の損耗量の増大³⁴

表 2.3 にアークエネルギーと銅母線の損耗量との関係を示す。アークエネルギーの増加に伴い銅母線の損耗量も増大するが、アークエネルギー当たりの銅母線の損耗量は、アークエネルギーの増加に伴い一段と増大する。例えば、アークエネルギーが 4.5 MJ から 45.8 MJ に増加すると、アークエネルギー当たりの銅母線の損耗量 (g/MJ) は 3.8 倍になった。アークエネルギーに対する銅母線の損耗比が大きくなる理由は、図 2.9 から以下の様に説明できると考えられる。

アークエネルギーが 4.5 MJ における試験体内は、図 2.9 の②三相短絡から⑤高温高压空気噴出に近い状態であると考えられる。この時の銅母線は、アーク放電により室温から急激に温度が上昇していると考えられるが、銅母線の温度上昇（室温から 1358 K～2343 K）に多くの熱が必要であるため、銅母線のうち溶融・蒸発できる温度に到達している領域が小さく、銅母線の損耗量は小さいと推定される。

アークエネルギーが 14.0 MJ 及び 24.6 MJ における試験体内は、図 2.9 の②三相短絡から⑥金属蒸気噴出・酸化に近い状態であると考えられる。この時の銅母線において、アーク放電による熱により銅母線の溶融・蒸発できる温度に到達している領域が拡大しており、銅母線の損耗量はより大きくなっていると推定される。

アークエネルギーが 45.8 MJ における試験体内は、図 2.9 の②三相短絡から⑦金属蒸気大量噴出・酸化に近い状態であると考えられる。この時の銅母線において、アーク放電による熱により銅母線の溶融・蒸発できる温度に到達している領域がさらに拡大して、大量の金属蒸気が発生することで銅母線の損耗量がさらに大きくなっていると推定される。

表 2.3 アークエネルギーと銅母線の損耗量との関係

Table 2.3 Relationship between arc energy and copper bus bar weight loss

アーク放電時間 (s)	アークエネルギー (MJ)	銅母線の損耗量 (g)	アークエネルギー当たりの 銅母線の損耗量 (g/MJ)	アークエネルギー当たりの 銅母線の損耗比* (-)
0	0	0	0	-
0.106	4.5	51	11.3	1.0
0.519	14.0	388	27.7	2.5
1.06	24.6	857	34.8	3.1
2.06	45.8	1945	42.5	3.8

*最小のアーク放電時間(0.106 s)の時のアークエネルギー(4.5 MJ)を基準とした。

2.3.9 HEAF の爆発現象における熱影響の評価の考え方

2.3.6 で述べたように、HEAF の爆発現象として試験体の周囲に大きな影響を及ぼす現象は、試験体内で観測される圧力の最大値が大きくないため、図 2.9 の⑦金属蒸気大量噴出・酸化であると推定される。一方、金属蒸気の噴出・酸化が少ない場合には、必然的に試験体の開口部からのアーク放電に由来する輻射熱が、試験体の周囲に熱影響を及ぼす主要因になると推定される。したがって、HEAF の ZOI を把握するためには、金属蒸気の噴出・酸化における現象が周囲に及ぼす熱影響及びアーク放電に由来する輻射熱を評価する必要がある。

金属母線の損耗量は、図 2.9 に示す①試験前と⑧試験後における金属母線の重量変化から求めることができる。試験後の試験体内には、金属母線の溶融物や欠片が存在する場合もあることから、金属蒸気の発生量は、金属母線の損耗量から金属母線の溶融物や欠片を引いた値になる。図 2.11 には銅母線を用いた HEAF 試験前後の試験体内の写真を示す。試験体内の壁面に付着している物質をエネルギー分散型 X 線分光法（EDS）等で分析した結果、銅の付着物であった。このように金属蒸気が付着した痕跡が試験後の試験体内の壁面に認められることから、金属蒸気の噴出量は、金属蒸気の発生量から試験体内の壁面への付着量や試験体内に残留する金属蒸気量を引いた値になる。そのため、母線由来の金属蒸気の噴出量は、金属母線の損耗量よりも小さい値になる。

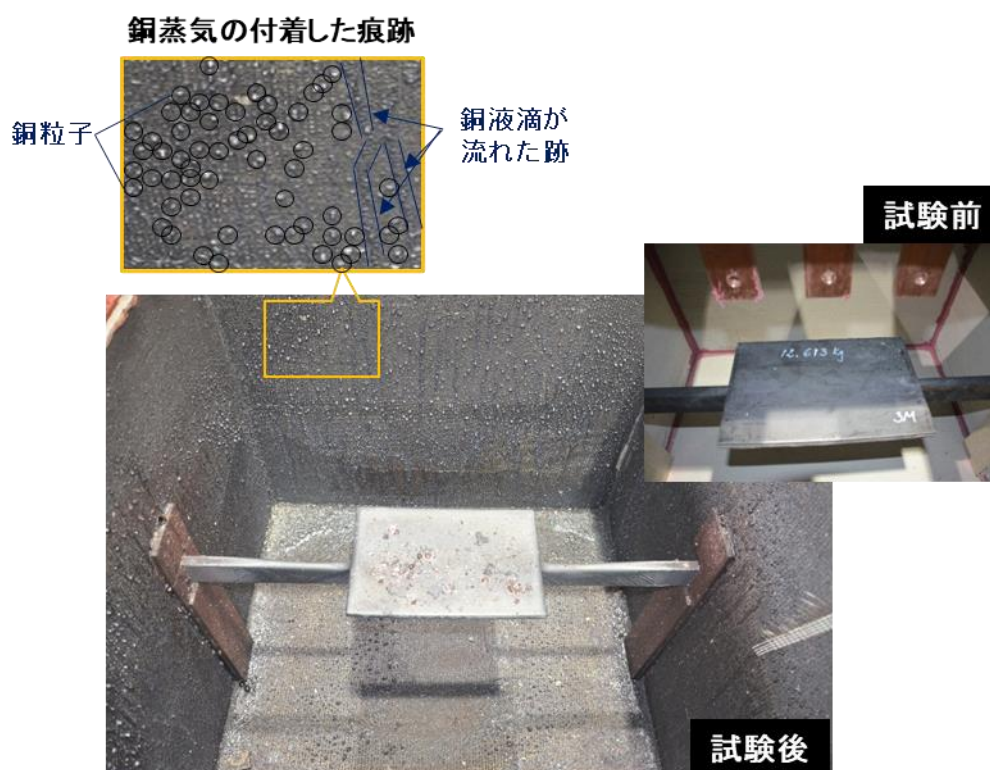


図 2.11 試験体内において発生した金属蒸気が壁面に付着した痕跡

Fig. 2.11 Traces of metal vapor generated inside the test box adhering to the wall surface

金属母線の損耗量は、試験前後の重量変化から求めることができるが、試験結果を踏まえると、金属母線の損耗量は、アークエネルギー（電圧値、短絡電流値、アーク放電時間）及び金属母線の材質（銅、アルミニウム）・サイズに大きく依存する。そのため、HEAF 時の金属母線の損耗量は原子力発電所における各電気盤によって大きく異なることから、周囲への熱影響もそれに伴い変化する。したがって、各電気盤における周囲への熱影響が一律とはならないため、試験で得られた金属母線の損耗量を基に保守的な熱影響を評価することが適当と考えられるが、より精緻に評価を行うためには電気盤ごとに上記の因子を考慮し周囲への熱影響を精査する必要がある。

参考として、HEAF の爆発現象における熱影響の評価手法の一例³¹⁻³³を以下に示す。

- ・ HEAF 時に発生する金属蒸気の全てが各電気盤の開口部から噴出すると仮定する。ここで、金属蒸気の噴出量は、金属母線の損耗量等で代用する。また、電気盤の開口面積は、各電気盤に固有の値を使用する。
- ・ 噴出する金属蒸気の温度は、その金属の沸点（例えば、銅：2570℃、アルミニウム：2518℃）とし、金属蒸気が開口部から噴出後直ちに酸化すると仮定する。また、HEAF の爆発現象が試験体外に及ぼす熱影響は、開口部から噴出した金属蒸気の熱影響や試験体内で発生しているアーク放電等からの輻射熱等が複合したものであると仮定する。この仮定において開口部からの距離に応じた熱流束を求め、電気盤の周囲における熱流束の値と損傷基準のしきい値（3.2 で後述）を比較することで、周囲への熱影響を評価する。

2.4 HEAF 試験研究のまとめ

爆発現象に関する本 HEAF 試験研究で得られた主な知見は、次のとおりである。

- ・ 本 HEAF 試験における試験体内圧力は、約 50～230 kPa（ゲージ圧）であった。
- ・ 本 HEAF 試験における試験体内圧力の変化は、初期の圧力スパイクとその後の安定な圧力の継続という 2 つの過程に分けられた。高速度カメラ等の解析結果から、初期の圧力スパイクが主に空気の熱膨張によるもの、その後の安定な圧力が金属蒸気の発生によるものであることが示唆された。
- ・ HEAF の主な爆発現象は、高温高压空気噴出（圧力スパイク）及び金属蒸気噴出（安定な圧力）・酸化の二つであると推定された。高温高压空気噴出が試験体外に及ぼす影響は小さいと考えられる一方で、金属蒸気噴出・酸化は、試験体外に対して有意な熱影響を及ぼすと考えられる。
- ・ HEAF の爆発現象が試験体外に及ぼす熱影響は、開口部からの金属蒸気の噴出量や試験体内で発生しているアーク放電等からの輻射熱等からある程度推定できるものと考えられる。金属蒸気の噴出量は、金属母線の損耗量等から算出することで保守的な評価となる。金属母線の損耗量は、アークエネルギー（電圧値、短絡電流値、アーク放電時間）及び金属母線の材質（銅、アルミニウム）・サイズに大きく依存する。

3. HEAF の影響範囲（ZOI）に関する分析

3.1 HEAF の爆発現象に対する ZOI 評価における基本的な考え方

HEAF には、第一段階における爆発現象と第二段階におけるアーク火災がある。そのため、HEAF の ZOI については、爆発現象とアーク火災の熱影響をそれぞれ分けて分析する必要がある。しかしながら、前述のとおり、HEAF に係るアーク火災の発生防止に関する規則等の改正等¹⁸が施行され、事業者が電気盤における遮断器の遮断時間の調整等によりアーク放電の継続時間を短縮することで、爆発の影響を減少させ、故障による影響をより局所化するとともに、アーク放電に伴う発熱によるアーク火災を防止する対策を実施していることから^{28,29}、本 NRA 技術報告では、第一段階における爆発現象に対する ZOI についてのみ分析する。

HEAF の爆発現象への対応として、その爆発現象に対応した ZOI を適切に設定する必要がある。第 2 章までの研究成果を踏まえると、HEAF の爆発現象として試験体の周囲に大きな熱影響を及ぼす現象は、金属蒸気噴出・酸化であると推定された。したがって、HEAF の爆発現象に対する ZOI については、開口部からの金属蒸気の噴出量や試験体の内部で発生しているアーク放電からの輻射熱の見積りが重要である。ただし、HEAF 時に放出されるアークエネルギーが小さく金属蒸気の噴出量自体が少ない場合には、アーク放電の輻射熱の見積りから ZOI を推定することが合理的であると考えられる。

3.2 HEAFの影響を受ける設備に係る米国の損傷基準

前述のとおり、HEAFに係るアーク火災の発生防止に関する規則等の改正等¹⁸が施行されたことを受けて、各原子力発電所の規制対象となる電気盤では、アーク火災発生防止対策が実施されているため、HEAFが発生したとしても放出されるアークエネルギーは、25 MJ以下になっている。

HEAFのZOIの評価に必要な、HEAFの影響を受ける設備の損傷について米国の損傷基準（設備が損傷する熱量の目安）を表3.1に示す³⁰。米国の損傷基準におけるしきい値は、各設備（ターゲット）への輻射エネルギー（MJ/m²）で示されており、熱影響により脆弱な熱可塑性ケーブル及びアルミニウム製母線ケース（バスダクト）のしきい値は、15 MJ/m²とされている。そのため、本NRA技術報告におけるZOI評価では、25 MJ以下のアークエネルギーにおけるHEAFの爆発現象に対する電気盤での設備損傷の判断のしきい値（以下「損傷基準のしきい値」という。）は、米国の損傷基準のうち、より保守的なしきい値である15 MJ/m²を用いる。

表 3.1 HEAFに係る損傷基準

Table 3.1 Target fragility thresholds related to HEAF

ターゲットの種類	しきい値 (MJ/m ²)
TP jacketed cables（熱可塑性ケーブル）	15
TS jacketed cables（熱硬化性ケーブル）	30
Aluminum enclosed bus ducts（アルミニウム製バスダクト）	15
Steel enclosed bus ducts（鋼製バスダクト）	30

TP: Thermoplastic、TS: Thermoset

出典) Target Fragilities for Equipment Vulnerable to High Energy Arcing Faults³⁰

3.3 25 MJ 以下のアークエネルギーにおける HEAF の爆発現象に対する ZOI の推定例

図 2.1 の基準試験体における金属母線の損耗量は、図 2.10 に示すとおりアークエネルギーが約 25 MJ において、銅 857 g (13.5 mol)、アルミニウム 595 g (22.1 mol) 程度であった。また、サイズの大きい高圧電源盤のアルミニウム母線の場合には、母線の損耗量は上記アルミニウムの半分程度であった。さらに、金属母線の溶融物や欠片が試験後の試験体内に残存する場合や金属蒸気が試験体内の壁面に付着した痕跡が認められることなどから、母線由来の金属蒸気の噴出量は、実際には、金属母線の損耗量よりも小さい値になる。

高圧電源盤の短絡を模擬した本試験条件（初期電圧値 7 kV、短絡電流値 23 kA、アークエネルギー 25 MJ（アーク放電時間 1 s））において、本試験結果よりも多くの銅蒸気 1,000 g が図 2.1 の基準試験体における一つの開口部から噴出すると仮定した銅蒸気・粒子の熱流動解析では、開口部から直線的に噴出した場合に直線距離が 2 m 付近で最大の熱流束を示すものの熱流束の積算値（ターゲットへの輻射エネルギー）は、 15 MJ/m^2 より十分に小さい値となった³¹⁻³³。そのため、HEAF 時のアークエネルギーが 25 MJ 以下の場合には、保守的に熱影響の解析を行ったとしても噴出方向における金属蒸気の噴出・酸化のみによる熱流束の積算値が米国における損傷基準のしきい値である 15 MJ/m^2 よりも十分に小さい値になると考えられる。したがって、アークエネルギーが 25 MJ 以下の HEAF の爆発現象にて生成する金属蒸気の噴出による影響では、電気盤周囲のケーブルや母線ケースに損傷は生じないため、アーク放電に起因する内部からの輻射熱を基に ZOI を推定することが合理的であると考えられる。

以上から 3.3.1 及び 3.3.2 では、ZOI の推定は、アークエネルギー 25 MJ（アーク放電時間 1 s）が放出されると仮定し、アーク放電等に起因する輻射熱に基づき行った。

3.3.1 アーク放電に起因する輻射熱に基づく ZOI の推定

輻射熱（放射熱）は、物体を介さずに赤外線を介して離れたところに伝わる熱のことを指す。アーク放電に起因する金属蒸気が発生しないと仮定した場合に、アーク放電に起因する輻射熱の発生源が球殻の中心にあるとすれば、球面の大きさが発生源から球面までの距離の 2 乗に比例することから、球面における輻射熱は、球面と発生源の距離の 2 乗に反比例する（逆 2 乗の法則）*。

アーク放電に起因する輻射熱による熱影響の及ぶ範囲は、式 3.1 に示す式を使用して算出した。式 3.1 は球体の表面積を求める式を応用したものであり、ここでは、HEAF 時に中心部から所定のアークエネルギー（ E_{arc} ）が放出され、そのエネルギーの全てが輻射熱として減衰することなく周囲へ等方的に熱影響を及ぼすと仮定し、損傷基準のしきい値（ $E_{threshold}$ ）と同じ値になる距離（ D ）を算出するものである。

$$E_{arc} = A \cdot E_{threshold} = 4\pi D^2 \cdot E_{threshold}$$

$$D^2 = E_{arc} / (E_{threshold} \cdot 4\pi)$$

$$D = \sqrt{\frac{E_{arc}}{E_{threshold} \times 4\pi}} \quad \dots \dots (3.1)$$

A : 面積 [m^2]

D : 距離 [m]

E_{arc} : HEAF のアークエネルギー [J]

$E_{threshold}$: 損傷基準のしきい値 [J/m^2]

例えば、25 MJ（アーク放電時間 1 s）のアークエネルギーが HEAF 時に放出され、その場合の損傷基準のしきい値（ $E_{threshold}$ ）が $15 MJ/m^2$ であると仮定し計算すると $15 MJ/m^2$ になる中心（アーク放電）からの距離（周辺の設備が損傷する可能性のある距離）は、約 0.36 m となる。そのため、アーク放電に起因する輻射熱に基づく ZOI は、約 0.36 m と推定される。

*アーク放電由来の輻射熱を逆 2 乗の法則に基づき評価する式が過去に提案されている^{36, 37}。

3.3.2 アーク放電に起因する輻射熱に金属蒸気の酸化熱を加えた条件での ZOI の推定

試験結果を踏まえると図 2.10 に示す様に 25 MJ 前後のアークエネルギーにおける金属母線の損耗量は、銅 857 g (13.5 mol)、アルミニウム 595 g (22.1 mol) 程度であった。保守的な想定をすると酸化熱が無視できない可能性があるため、ZOI の推定は、アーク放電に起因する輻射熱に加えて、損耗した金属母線が金属蒸気となり酸化した場合のエネルギーの増分を輻射熱として加算することにより行った。

銅及びアルミニウムの酸化還元エネルギーを図 3.1 に示す³⁷⁾。銅母線の場合、銅蒸気の発生に約 392.3 kJ/mol のエネルギーが必要であるが、発生した全ての銅蒸気が酸化して保守的に CuO になったと仮定すると、約 548.3 kJ/mol のエネルギーが放出される。そのため、銅母線による酸化エネルギーの増分は約 156.1 kJ/mol となる。

一方、アルミニウム母線の場合、アルミニウム蒸気の発生に約 381.7 kJ/mol のエネルギーが必要であるが、発生した全てのアルミニウム蒸気が酸化して Al_2O_3 になったと仮定すると、約 1210.1 kJ/mol のエネルギーが放出される。そのため、アルミニウム母線による酸化エネルギーの増分は約 828.5 kJ/mol となる。

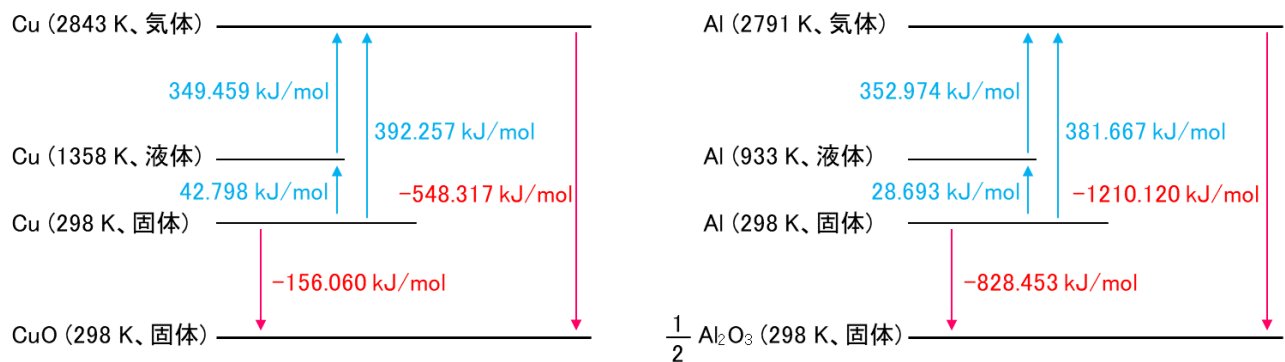


図 3.1 銅及びアルミニウムの酸化還元エネルギー

Fig. 3.1 Oxidation and reduction energies of copper and aluminum

金属蒸気が試験体内ですべて酸化することは、試験体内に存在する空気量が限定されて少ないこと、又試験体内に存在する空気がアーク放電の熱により熱膨し、短時間で試験体外に排出されるため、実際には困難であるが、保守的な ZOI を推定するため、アーク放電に起因する輻射熱に金属蒸気の酸化熱を加えた条件での熱影響の及ぶ範囲を算出するために使用した式は、式 3.2 に示すとおりとした。式 3.2 は、損傷基準のしきい値 ($E_{\text{threshold}}$) となる中心からの距離 (D) を算出するものであり、HEAF 時におけるアークエネルギー (E_{arc}) に、金属蒸気を発生させるのに必要なエネルギー (E_{vapor}) と金属蒸気の酸化エネルギーとの差を加算し、そのエネルギーの全てが減衰することなく輻射熱として周囲に熱影響を及ぼすと仮定している。

$$D = \sqrt{\frac{(E_{\text{arc}} - E_{\text{vapor}} + E_{\text{oxidation}})}{E_{\text{threshold}} \times 4\pi}} \quad \dots \dots (3.2)$$

D : 距離 [m]

E_{arc} : HEAFのアーケエネルギー [J]

$E_{\text{threshold}}$: 損傷基準のしきい値 [J/m^2]

E_{vapor} : 金属蒸気を発生させるのに必要なエネルギー [J]

$E_{\text{oxidation}}$: 金属蒸気の酸化エネルギー [J]

例えば、25 MJ（アーケ放電時間 1 s）のアーケエネルギーが HEAF 時に放出される場合、金属母線の損耗量が銅 857 g（13.5 mol）及びアルミニウム 595 g（22.1 mol）であると仮定すると、エネルギーの増分は、銅母線が 2.10 MJ 及びアルミニウム母線が 18.3 MJ となる。その場合、損傷基準のしきい値が $15 \text{ MJ}/\text{m}^2$ であると仮定すると、輻射熱及び金属蒸気の酸化熱によるエネルギーが $15 \text{ MJ}/\text{m}^2$ になる中心（アーケ放電）からの距離（周辺の設定が損傷する可能性のある距離）は、銅母線の場合、約 0.38 m 及びアルミニウム母線の場合、約 0.48 m と算出された。

そのため、アーケ放電に起因する輻射熱に金属蒸気の酸化熱を加えた条件でも HEAF の爆発現象に対する ZOI は、アーケエネルギーが 25 MJ 以下であれば、0.5 m 以下であると推定される。

3.3.3 HEAF 審査ガイド及び米国における HEAF の ZOI

HEAF 規制対象の電気盤（保安電源設備に係る電気盤）の ZOI に関して、HEAF 審査ガイド¹⁹の「(解説-6) 電気盤に影響を与えるおそれのある範囲について」において、電気盤に影響を与えるおそれのある範囲の目安として女川 1 号機での経験から水平距離 2.5 m が例示されている。また、「影響を与えるおそれのある範囲の目安として、2.5 m 以内にあるものとした。」と記載されている。

HEAF が爆発性の電気故障であることを踏まえれば、現在の HEAF 審査ガイドに基づく HEAF の ZOI は、等方的に 2.5 m であると言える。ただし、「実験等によりアーク火災の影響範囲が特定できる場合は、その結果を考慮する必要がある。」とも記載されている。

米国においても、HEAF の ZOI についての検討が行われ、日本の高圧電源盤に相当する電気盤に対する ZOI がいくつかのモデルによって提案されている³⁸⁻⁴⁰。その中で最も保守的な条件（初期電圧値 6.9 kV、短絡電流値 23 kA、アーク放電時間 8.85 s 相当）での HEAF の ZOI は、1.64 m になっている³⁹。ただし、日本のアーク火災発生防止に係るアークエネルギーのしきい値である 25 MJ の条件に近い HEAF の ZOI は、アルミニウム母線の場合でも、0.39 m になっている³⁹。

以上、現状においても、HEAF 審査ガイド¹⁹によって、HEAF の ZOI が目安として例示されている。また、米国においても HEAF の ZOI が提案されている³⁸⁻⁴⁰。

3.4 HEAF の ZOI に関する分析のまとめ

HEAF の ZOI に関して分析した結果のまとめは、次のとおりである。

- 研究成果を踏まえると、HEAF の爆発現象として試験体の周囲に大きな熱影響を及ぼす現象は、金属蒸気やアーク放電からの熱輻射であると推定される。したがって、HEAF の爆発現象に対する ZOI を推定する場合、開口部からの金属蒸気の噴出量や試験体の内部で発生するアーク放電からの輻射熱の見積りが重要であると考えられる。
- HEAF の ZOI の評価に用いられている米国における損傷基準のしきい値は、各設備（ターゲット）への輻射エネルギー（MJ/m²）で示されており、熱影響により脆弱な熱可塑性ケーブル及びアルミニウム製母線ケース（バスダクト）においては、そのしきい値が 15 MJ/m²とされている³⁰。
- 高圧電源盤の短絡を模擬した本試験条件（初期電圧値 7 kV、短絡電流値 23 kA、25 MJ（アーク放電時間 1 s））のアークエネルギーにおいて、開口部から本試験結果よりも多くの 1,000 g の銅蒸気が噴出すると仮定した銅蒸気・粒子の熱流動解析において、開口部からの距離が 2 m 付近で最大の熱流束を示すものの熱流束の積算値は、15 MJ/m² より十分に小さい値になった³¹⁻³³。そのため、HEAF 時に放出されるアークエネルギーが 25 MJ 以下の場合、アーク放電からの輻射熱を基に ZOI を推定することが合理的であると考えられる。
- 25 MJ（アーク放電時間 1 s）のアークエネルギーが HEAF 時に放出される場合、損傷基準のしきい値として 15 MJ/m² を用いると各設備（熱可塑性ケーブル及びアルミニウム製母線ケース（バスダクト））が影響を受ける距離（周辺の設定が損傷する可能性のある距離）は、ZOI が熱源を中心とする球体を仮定した場合に 0.36 m と算出された。したがって、アーク放電の輻射熱に基づいた HEAF の爆発現象に対する ZOI は 0.36 m であると推定される。
- 25 MJ（アーク放電時間 1 s）のアークエネルギーが HEAF 時に放出される場合、実電気盤を模擬した実験結果から金属母線の損耗量が、銅 857 g（13.5 mol）及びアルミニウム 595 g（22.1 mol）であると仮定すると、酸化によるエネルギーの増分は、銅母線が 2.10 MJ 及びアルミニウム母線が 18.3 MJ となる。その場合に、損傷基準のしきい値として上記と同様に 15 MJ/m² を用いると、各設備（熱可塑性ケーブル及びアルミニウム製母線ケース（バスダクト））が影響を受ける距離は、銅母線の場合 0.38 m、アルミニウム母線の場合 0.48 m と推定された。したがって、アーク放電に起因する輻射熱に金属蒸気の酸化熱を加えた条件でも HEAF の爆発現象に対する ZOI は、0.5 m 以下であると推定される。

4. おわりに

隣接機器等への影響が懸念される HEAF の第一段階における爆発現象に関する知見を取得することを目的として、実電気盤を模擬した試験体を用いて HEAF 試験を行い、爆発圧力、爆発メカニズム、金属蒸気の噴出量等に関するデータ・映像等を取得した。

試験研究の結果、HEAF の爆発現象は、主としてアーク放電に伴う空気の熱膨張と金属蒸気の噴出であることが示唆された。また、試験結果を踏まえて、国内の実機におけるアーク火災発生防止対策済みの条件（アークエネルギー：25 MJ 以下）での HEAF の第一段階における爆発現象の ZOI を推定した。これらの知見について、本 NRA 技術報告に取りまとめた。

本研究で得られた知見を踏まえれば、以下の箇条書きで記した理由から、HEAF の第一段階における爆発現象の観点について、関連する規則及び HEAF 審査ガイドへの反映は不要であると考えられる。なお、諸外国において HEAF に関する検討が継続されていることから、引き続き情報収集を行う。

- ・ HEAF 審査ガイドでは、電気盤に影響を与えるおそれのある範囲の目安として女川 1 号機での経験から水平距離 2.5 m が例示されている。
- ・ 実機においては、HEAF 審査ガイドによるアーク火災の発生防止対策として、重要安全施設への電力供給に係る電気盤及びその電気盤に影響を与えるおそれのある電気盤（2.5 m 以内にある電気盤）については、アーク火災が発生しないように電力事業者自らが HEAF 時に放出されるアークエネルギーを 25 MJ 以下に制限している。
- ・ 上記条件を踏まえた本研究における試験結果から、HEAF 時のアークエネルギーが 25 MJ 以下の電気盤については、HEAF の第一段階における爆発現象の ZOI は、盤内部の金属母線（アーク発生箇所）を基準として 0.5 m 以下と推定された。すなわち、HEAF 時のアークエネルギーが 25 MJ 以下の電気盤については、周辺の電気盤の距離が 0.5 m 以上離れていれば、HEAF の第一段階における爆発現象は有意な影響を与えないと考えられる。
- ・ HEAF 審査ガイドでは、HEAF 発生時に周囲の電気盤に影響を与えるおそれのある範囲の目安として水平距離 2.5 m が既に例示され、HEAF 対策の目安として使用されているが、この水平距離 2.5 m は、HEAF 時のアークエネルギーが 25 MJ 以下の電気盤であれば、HEAF の第一段階における爆発現象の ZOI を考慮しても保守的な値であることが確認できた。

謝辞

本 NRA 技術報告の作成に当たっては、S/NRA/R の請負事業にて実施した HEAF 試験のデータを使用した。実際に S/NRA/R の HEAF 試験を実施してデータを取得した団体、企業は、次のとおりである。ここに感謝の意を表する。

KEMA Laboratories

Southwest Research Institute (SwRI)

Brendan Stanton Incorporated (BSI)

参考文献一覧

- 1 U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Metalclad switchgear failures and consequent losses of offsite power”, Information Notice 2002-01, 2002.
<https://www.nrc.gov/docs/ML0135/ML013540193.pdf> (2025年1月16日確認)
- 2 OECD Nuclear Energy Agency, “Analysis of High Energy Arcing Faults (HEAF) Fire Events”, OECD FIRE Project - TOPICAL REPORT No. 1, NEA/CSNI/R(2013)6, 2013.
<https://www.oecd-neo.org/nsd/docs/2013/csni-r2013-6.pdf> (2025年1月16日確認)
- 3 OECD Nuclear Energy Agency, “Event Combinations of Fires and Other Events”, OECD FIRE Project - TOPICAL REPORT No. 3, NEA/CSNI/R(2016)7, 2016.
<https://www.oecd-neo.org/nsd/docs/2016/csni-r2016-7.pdf> (2025年1月16日確認)
- 4 原子力規制委員会、NRA 技術報告、「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」、NTEC-2016-1002、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11235834/www.nsr.go.jp/data/000145383.pdf>
(2025 年 1 月 16 日確認)
- 5 Tsuchino, S., Kabashima, H., Turner, S., Mehta, S., Stroup, D., Melly, N., Taylor, G., and Gonzalez, F., “Nuclear Regulatory Authority Experimental Program to Characterize and Understand High Energy Arcing Fault (HEAF) Phenomena”, NUREG/IA-0470 Volume 1, 2016.
<https://www.nrc.gov/docs/ML1623/ML16235A163.pdf> (2025 年 1 月 16 日確認)
- 6 OECD Nuclear Energy Agency, “Report on the Testing Phase (2014-2016) of the High Energy Arcing Fault Events (HEAF) Project: Experimental Results from the International Energy Arcing Fault Research Programme”, OECD HEAF Project, NEA/CSNI/R(2017)7, 2017.
<https://www.oecd-neo.org/nsd/docs/2017/csni-r2017-7.pdf> (2025 年 1 月 16 日確認)
- 7 Kabashima, H., “Fire Safety Research on High Energy Arcing Fault (HEAF)”, EUROSAFE Forum Newsletter, 2017.
- 8 U.S. Nuclear Regulatory Commission, “An International Phenomena Identification and Ranking Table (PIRT) Expert Elicitation Exercise for High Energy Arcing Faults (HEAFs)”, NUREG-2218, 2018.
<https://www.nrc.gov/docs/ML1803/ML18032A318.pdf> (2025 年 1 月 16 日確認)
- 9 東北電力株式会社、「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」、東北電力株式会社報告資料、平成 23 年。
- 10 「【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-M011Rev.4。
<http://www.nucia.jp/nucia/kn/KnTroubleView.do?troubleId=11314>
(2025 年 1 月 16 日確認)

- 11 梶島一、土野進、笠原文雄、「G5 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」、日本原子力学会 2013 年秋の大会、平成 25 年.
- 12 梶島一、土野進、笠原文雄、「N38 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」、日本原子力学会 2014 年春の年会、平成 26 年.
- 13 独立行政法人原子力安全基盤機構、「火災防護対策の高度化に係る調査・試験」、安全研究年報（平成 24 年度）、JNES-RE-2013-0001-Rev.1、pp369-376、平成 25 年.
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10207746/www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000125907.pdf>（2025 年 1 月 16 日確認）
- 14 Kabashima, H., Kasahara, F., “Experimental Study on High Energy Arcing Faults (HEAF) to Assist Fire Safety Regulation”, Proceedings of the 24th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 24) –15th International Post-Conference Seminar on “FIRE SAFETY IN NUCLEAR POWER PLANTS AND INSTALLATIONS”, Paper No. 03. HEAF (Special Issue) (2017).
- 15 Kabashima, H., “FIRE SAFETY REGULATION ON HIGH ENERGY ARCING FAULTS (HEAF)”, Proceedings of the Technical and Scientific Support Organizations (TSOs) in Enhancing Nuclear Safety and Security: Ensuring Effective and Sustainable Expertise Challenges Faced by Technical and Scientific Support Organizations Conference 2018, Paper ID No. 93, (2018).
- 16 原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、安全研究成果報告、「火災防護対策の高度化に係わる調査・試験」、RREP-2018-1002、平成 30 年.
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11203941/www.nsr.go.jp/data/000253082.pdf>
（2025 年 1 月 16 日確認）
- 17 Kabashima H., Kasahara, F., “Experimental Study of High Energy Arcing Faults Using Medium Voltage Metalclad Switchgears”, Nuclear Technology, Vol. 205, pp. 694-707, 2019.
<https://doi.org/10.1080/00295450.2018.1518556>
- 18 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に係る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等の一部改正等について（案）」、第 25 回原子力規制委員会、資料 1、平成 29 年.
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA001001439?contents=NRA001001439-002-002>
（2025 年 1 月 16 日確認）
- 19 原子力規制委員会、「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」、原規技発第 1707196 号、平成 29 年.
<https://www.nra.go.jp/data/000198398.pdf>（2025 年 1 月 16 日確認）
- 20 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に係る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等の一部改正等並びにそれらの意見募集等について
(案)」、第 62 回原子力規制委員会、資料 2、平成 29 年.

<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11402581/www.nsr.go.jp/data/000179744.pdf>

(2025 年 1 月 16 日確認)

- 21 原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、安全研究成果報告、
「火災防護に係る影響評価に関する研究」、RREP-2021-1002、令和 3 年.
<https://www.nra.go.jp/data/000355421.pdf> (2025 年 1 月 16 日確認)
- 22 原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、安全研究成果報告、
「火災防護に係る影響評価に関する研究 (フェーズ 2)」、令和 7 年度公表予定.
<https://www.nra.go.jp/data/000349564.pdf> (2025 年 1 月 16 日確認)
- 23 Kabashima, H., Kasahara, F., Eguchi, H., Mehta, S., Stroup, D., Melly, N., and Turner, S.,
“Nuclear Regulatory Authority Experimental Program to Characterize and Understand High
Energy Arcing Fault (HEAF) Phenomena”, NUREG/IA-0470 Volume 2, 2021.
<https://www.nrc.gov/docs/ML2129/ML21295A537.pdf> (2025 年 1 月 16 日確認)
- 24 松田航輔、笠原文雄、梶島一、宮崎利行、「高エネルギーアーク損傷 (HEAF) の爆
発現象に係る数値解析 (1) AUTODYN による電気盤モデルの圧力上昇評価の検討」、
日本原子力学会 2021 年春の年会、令和 3 年.
- 25 “IEEE Guide for Testing Metal-Enclosed Switchgear Rated Up to 38 kV for Internal
Arcing Faults”, IEEE C37.20.7-2007.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6046073> (2025 年 1 月 16 日確認)
- 26 電気事業連合会、「HEAF 火災規制化 (新知見) に対する事業者の取組み状況およ
び今後の対応について」、原子力規制委員会第 1 回 (高エネルギーアーク損傷) 新
規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合、資料 1-4、平成 29 年.
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA022011488?contents=NRA022011488-002-006#pdf=NRA022011488-002-006> (2025 年 1 月 16 日確認)
- 27 電気事業連合会、「アーク火災対策規制化に対する事業者回答について」、原子力規
制委員会第 2 回 (高エネルギーアーク損傷) 新規制要件に関する事業者意見の聴取
に係る会合、資料 2-2、平成 29 年.
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA022011489?contents=NRA022011489-002-003#pdf=NRA022011489-002-004> (2025 年 1 月 16 日確認)
- 28 電気事業連合会、「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
の取組み状況について」、原子力規制委員会第 3 回 (高エネルギーアーク損傷) 新
規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合、資料 3-2、平成 30 年.
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA022011490?contents=NRA022011490-002-004>
(2025 年 1 月 16 日確認)
- 29 東北電力株式会社、「女川原子力発電所第 2 号機 高エネルギーアーク損傷 (HEAF)

対策の概要について」、原子力規制委員会第 993 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合、資料 2-6、令和 3 年。

<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA022011128?contents=NRA022011128-002-008>

(2025 年 1 月 16 日確認)

- 30 U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Target Fragilities for Equipment Vulnerable to High Energy Arcing Faults”, Research Information Letter (RIL) 2022-01, 2022.
<https://www.nrc.gov/docs/ML2213/ML22131A339.pdf> (2025 年 1 月 16 日確認)
- 31 櫻井智明、梶島一、笠原文雄、吉井敏浩、「高エネルギーアーク損傷 (HEAF) の評価手法の整備 (1) Cu 蒸気の熱流動評価手法の検討」、日本原子力学会 2023 年春の年会、令和 5 年。
- 32 櫻井智明、梶島一、吉井敏浩、「高エネルギーアーク損傷 (HEAF) の評価手法の整備 (2) Cu 蒸気の酸化モデルの検討」、日本原子力学会 2023 年秋の大会、令和 5 年。
- 33 櫻井智明、梶島一、吉井敏浩、「高エネルギーアーク損傷 (HEAF) の評価手法の整備 (3) HEAF の爆発事象における輻射の検討」、日本原子力学会 2024 年春の年会、令和 6 年。
- 34 日本エヌ・ユー・エス、「原子力施設電気設備等火災試験」、令和 2 年度原子力規制庁請負成果報告書、令和 3 年。
- 35 NIST-JANAF Thermochemical Tables, <https://janaf.nist.gov/> (2025 年 1 月 16 日確認)
- 36 Phillips, J., Brainfiller, Inc., “Complete Guide to Arc Flash Hazard Calculation Studies, A step-by-step approach packed with examples, tips, and calculation worksheets”, 2011.
- 37 電力中央研究所、「原子力施設における電源設備への高エネルギーアーク故障 (HEAF) による熱的影響評価」、電力中央研究所報告、O20009、令和 3 年。
- 38 U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Determining the Zone of Influence for High Energy Arcing Faults using Fire Dynamics Simulator”, Research Information Letter (RIL) 2022-09, November 21, 2022.
<https://www.nrc.gov/docs/ML2232/ML22322A100.pdf> (2025 年 1 月 16 日確認)
- 39 U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Predicting High Energy Arcing Fault Zones of Influence for Aluminum Using an Arc Flash Modeling Approach, Evaluation of a modified model bias, uncertainty, parameter sensitivity and zone of influence estimation, Final”, Research Information Letter (RIL) 2023-01, February 14, 2023.
<https://www.nrc.gov/docs/ML2302/ML23026A353.pdf> (2025 年 1 月 16 日確認)
- 40 U.S. Nuclear Regulatory Commission, “High Energy Arcing Fault Frequency and Consequence Modeling”, Final Report (NUREG-2262, EPRI 3002025942), 2023.
<https://www.nrc.gov/docs/ML2310/ML23108A113.pdf> (2025 年 1 月 16 日確認)

付録 A. HEAF 試験情報及び試験データ

A.1 米国KEMA試験場

S/NRA/RのHEAF試験は、以下に示す米国ペンシルベニア州チャルフォントにあるKEMA試験場^{A-1}で実施した。なお、OECD/NEA HEAFプロジェクトや米国NRCも同上試験場にてHEAF試験を実施している。



図 A.1 米国 KEMA 試験場の概要

Fig. A.1 Overview of the KEMA Laboratories in the US

出典) 米国KEMA試験場のWebページ^{A-1}

A.2 米国KEMA試験場のテストセル

米国KEMA試験場には9つのテストセルがある。今回のHEAF試験ではNo. 9のテストセル（図A.2、図A.3）を使用した。



図 A.2 米国 KEMA 試験場の No. 9 テストセル

Fig. A.2 No. 9 test cell at KEMA Laboratories in the US



図 A.3 No. 9 テストセル内の様子

Fig. A.3 Inside the No. 9 test cell

A.3 短絡電流値の算出方法

HEAF試験において電気盤にアーク放電を発生させる電流の目標値として、短絡電流値を設定する必要がある。短絡電流値は、評価対象とする電気盤の受電側に接続している変圧器の二次側定格電流と当該変圧器の短絡インピーダンスによって算出した。

以下、電気盤における短絡電流値の算出方法について示す。

変圧器二次側の定格電流 I_0 は、三相定格容量 W 及び定格電圧 V_0 から求めた。

$$I_0 = W / (\sqrt{3} \times V_0) \quad \cdot \cdot \cdot (A.1)$$

I_0 :変圧器二次側の定格電流[A]、 W :三相定格容量[VA]、 V_0 :定格電圧[V]

また、計算上最大の三相短絡電流 I_b は、短絡インピーダンス Z 及び定格電流 I_0 から求めた。

$$I_b = I_0 \times 100 / Z \quad \cdot \cdot \cdot (A.2)$$

I_b :三相短絡電流[A]、 I_0 :定格電流[A]、 Z :短絡インピーダンス[%]

ここで、短絡インピーダンスとは、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、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比を百分率で表したものである。

A.4 HEAF試験に用いた電気回路

本HEAF試験では、図A.4に示す電気回路を用いた^{A-2}。

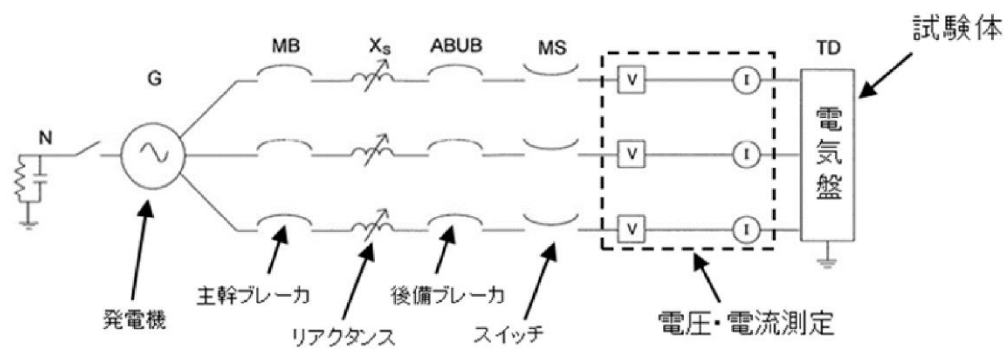


図 A.4 HEAF 試験に用いた電気回路

Fig. A.4 Electrical circuit used in HEAF tests

A.5 基準試験体の立面図

基準試験体の立面図を図A.5に示す。

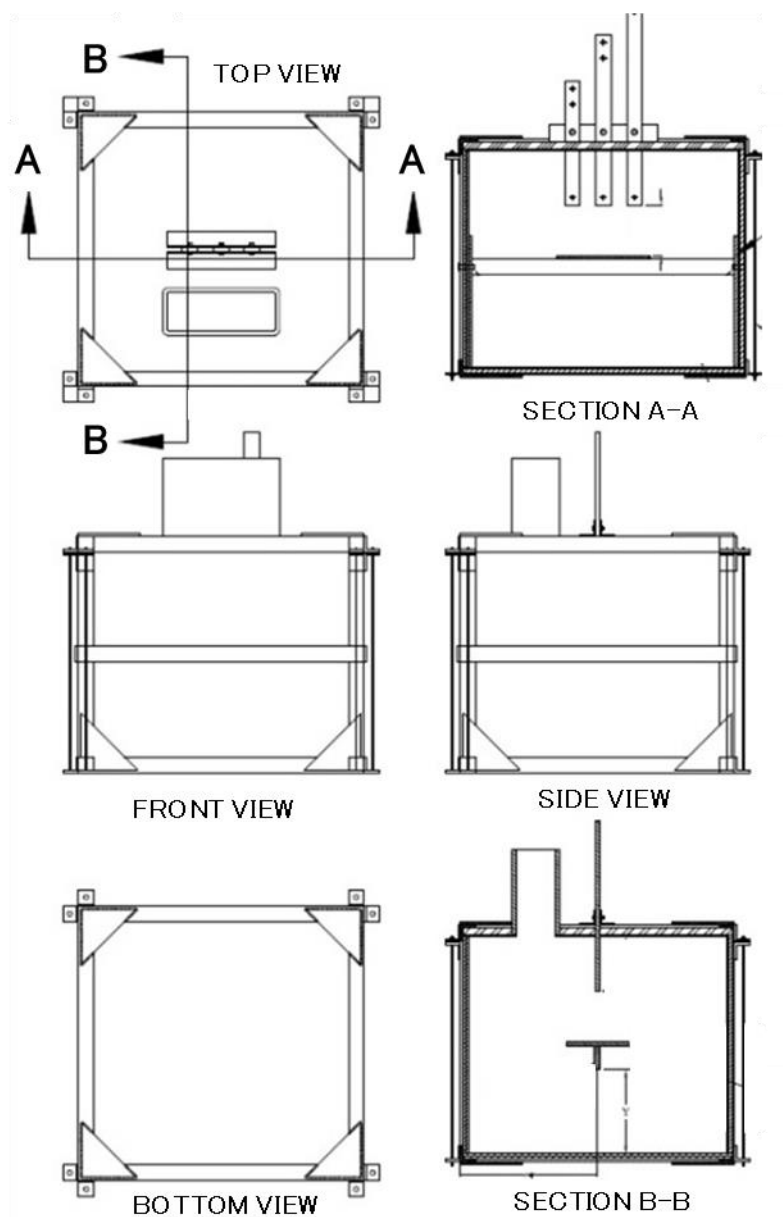


図 A.5 基準試験体の立面図

Fig. A.5 Elevation of reference test box

A.6 内容積の異なる5つの試験体（図2.5）の写真

内容積の異なる5つの試験体の写真を図A.6に示す。

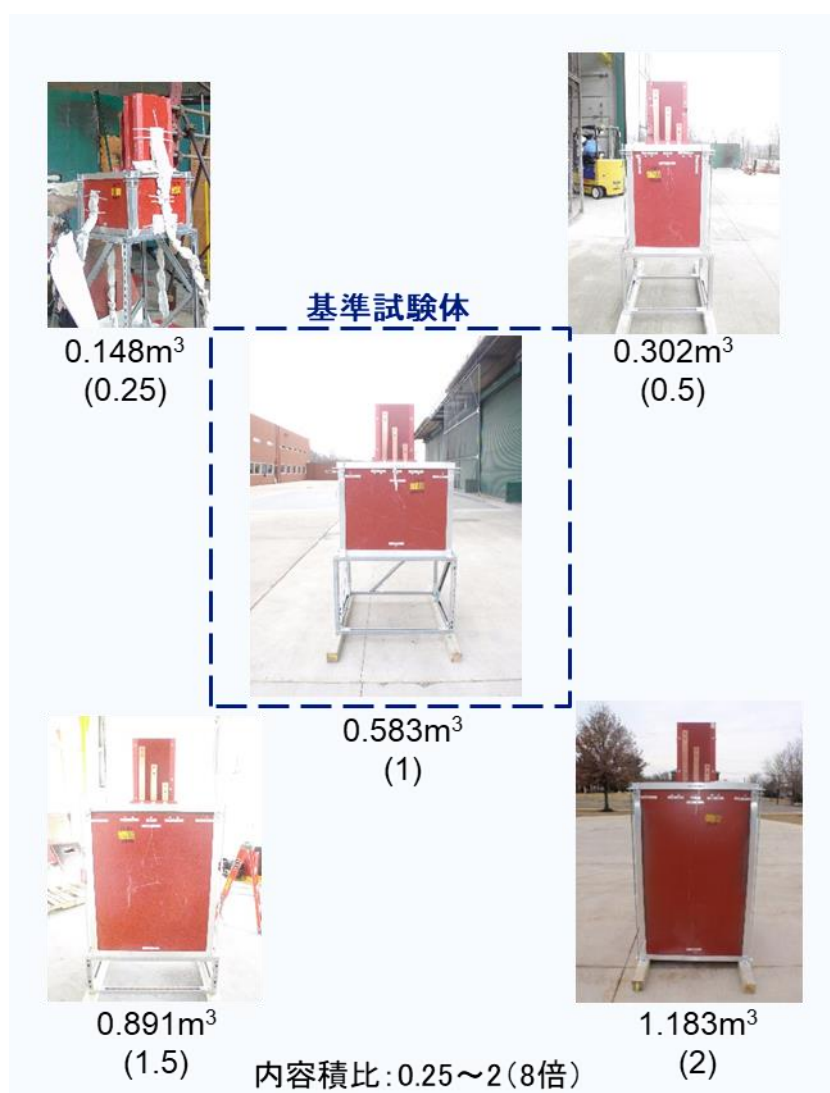


図 A.6 内容積の異なる 5 つの試験体の写真

Fig. A.6 Photos of five test boxes with different internal volumes

A.7 上部開口部の異なる試験体（図2.7）の写真

上部開口部の異なる試験体の写真を図A.7に示す。

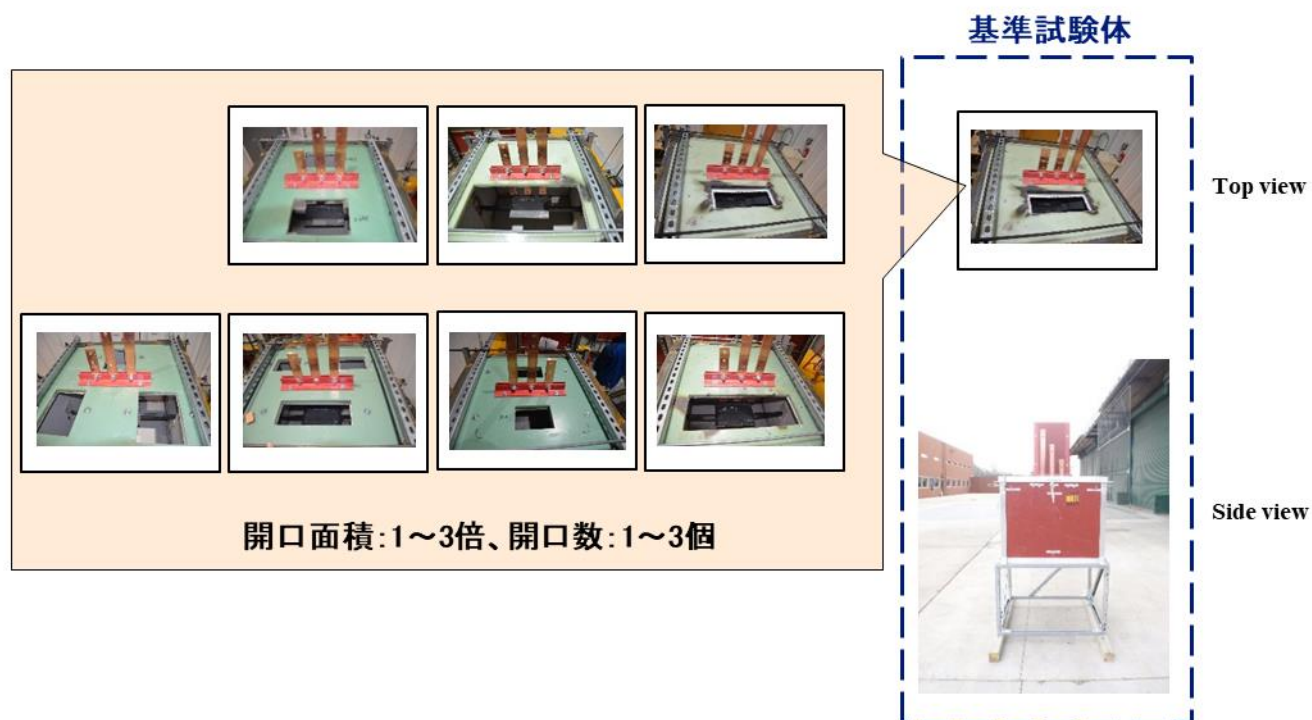


図 A.7 上部開口部の異なる試験体の写真

Fig. A.7 Photos of test boxes with different top openings

A.8 銅母線及びアルミニウム母線の写真

導電性針金でワイヤリングした銅母線及びアルミニウム母線の写真をそれぞれ図A.8及び図A.9に示す。

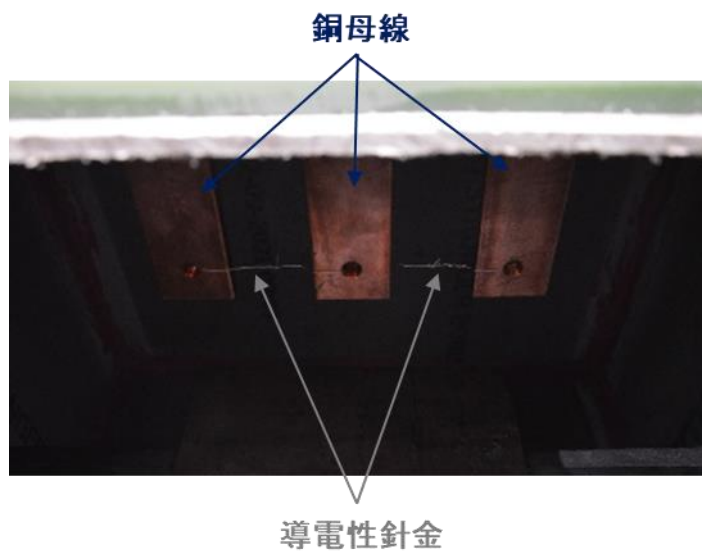


図 A.8 導電性針金でワイヤリングした銅母線
Fig. A.8 Copper bus bars wired with conductive wire

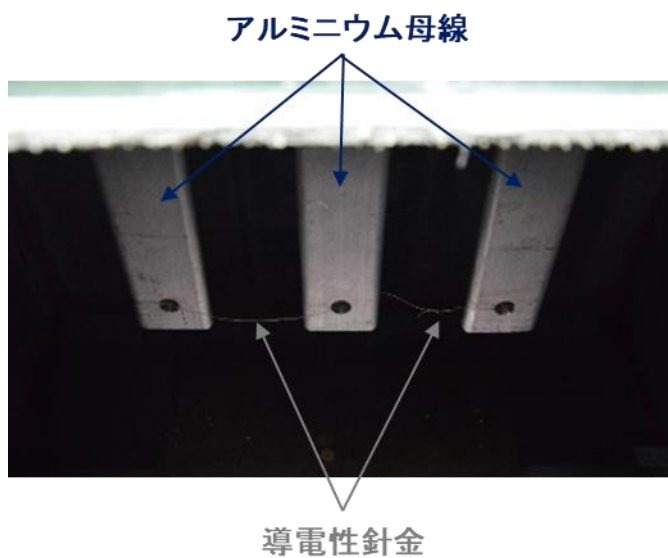


図 A.9 導電性針金でワイヤリングしたアルミニウム母線
Fig. A.9 Aluminum bus bars wired with conductive wire

A.9 測定項目

HEAF試験における測定項目等を表A.1に示す。

表 A.1 測定項目等

Table A.1 Measurement item

測定項目及び測定ツール	数	備考
1. 温度		
1a. 熱電対 (TC)	4 2 2	タイプ K Nanmac 製の侵食性熱電対 低ノイズ TC
1b. 受動式温度センサー	5 セット	試験体の全面に貼り付け
2. 圧力		
2a. 圧力トランスデューサ 内部圧力及び内部衝撃波	2 2	Omega PX309 シリコン、0-50 psi ゲージ PCB PZ-type 0-50 psi pressure ゲージ
3. 熱流束/熱量測定		
3a. スラグ・カロリメータ	6	ASTM F 1959 準拠 (開口部からの距離 50 cm、高さ 32 cm)
3b. SwRI の熱流束センサ	2	カスタムセンサ (開口部からの距離 50 cm、高さ 32 cm)
4. ビデオ及び写真		
4a. 高速度カメラ	1	毎秒 500 フレーム
4b. 赤外線カメラ	2	FLIR T420/HT
4c. 高解像度カメラ	1 セット	高解像度 (HD) カメラで試験動画を撮影
5. 写真	1 セット	試験の実施前後で写真撮影
6. 磁場		
6a. 磁場強度	1	磁場流束密度分析器 (Bartington Mag 690 3-axis magnetic flux density analyzer)
7. 電圧／電流波形測定	1 セット	
8. 質量	1	試験前後に金属母線の質量を測定

A.10 電圧・電流波形等の一例

初期電圧値 7 kV、短絡電流値 23 kV及び短絡時間2sの設定条件でアーク放電を発生させ HEAF試験を行った電圧・電流波形等の一例を図A.10に示す。なお図A.10は、図2.3及び図2.4のHEAF試験のものである。

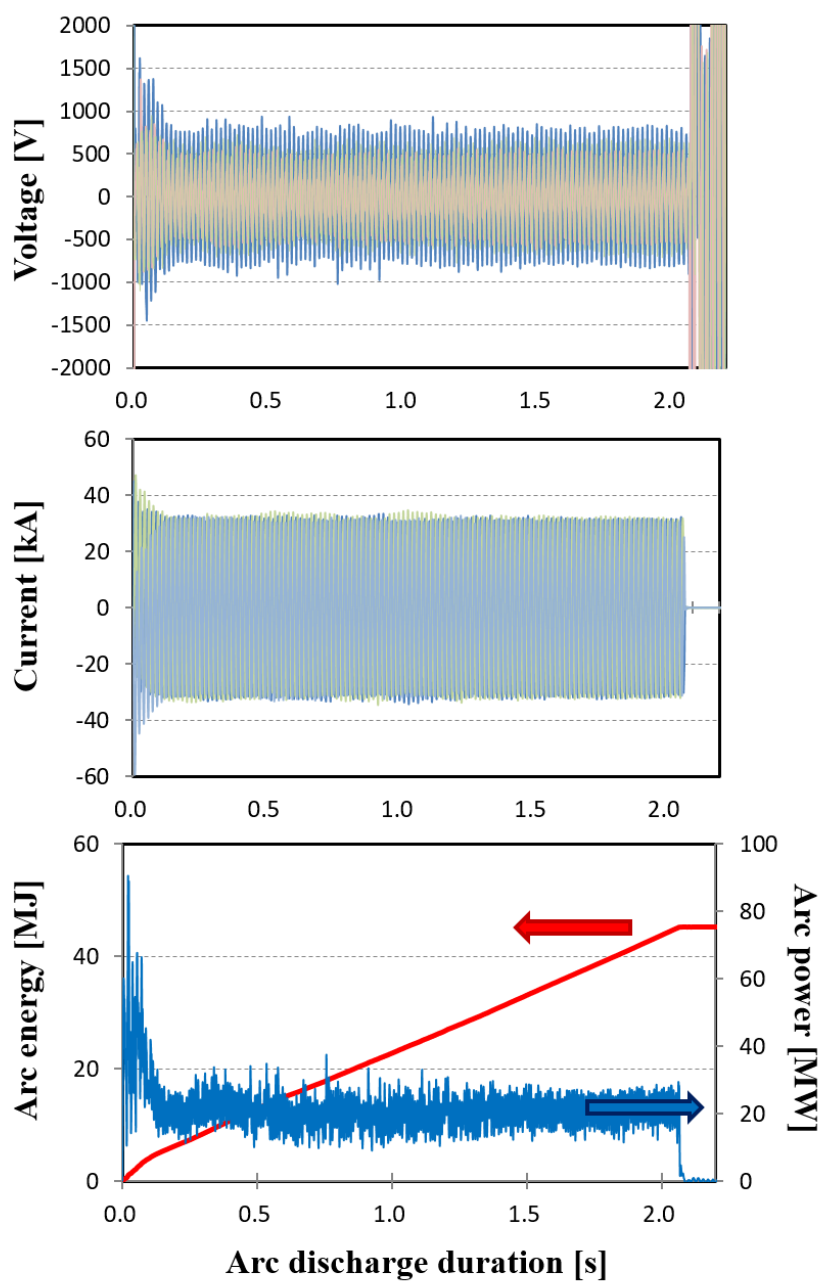


図 A.10 図 2.3 及び図 2.4 の HEAF 試験における電圧・電流波形、アークパワー、アークエネルギー

Fig. A.10 Voltage and current waveforms, arc power, and arc energy in the HEAF test shown in Fig. 2.3 and 2.4

A.11 試験データ一覧

HEAF試験のデータを表A.2～A.4に示す。

表A.2 内容積の異なる試験体^{a)}に関するHEAF試験^{b)}データ（図2.6のデータ）

Table A.2 HEAF test data for five boxes with different internal volumes (Data from Fig. 2.6)

テストNo.	試験体内容積 (m ³)	内容積比 (-)	最大圧力 ^{c)} (kPa)	備考
1	0.148	0.25	232	
2	0.302	0.5	152	
3	0.583	1	184	基準試験体
4	0.891	1.5	119	
5	1.183	2.	98	

^{a)}上部開口面積 0.0579 m² 1個、^{b)}初期電圧設定値 7 kV、短絡電流設定値 23 kV及び
短絡時間設定値 2 s、^{c)}測定誤差 ± 15 %

表A.3 上部開口部の異なる試験体^{a)}に関するHEAF試験^{b)}データ（図2.8のデータ）

Table A.3 HEAF test data for boxes with different top openings (Data from Fig. 2.8)

テストNo.	上部開口面積 (m ³)	上部開口面積比 (-)	開口数 (個)	最大圧力 ^{c)} (kPa)	備考
1	0.0579	1	1	168	基準試験体
2	0.1158	2	1	101	
3	0.1737	3	1	96	
4	0.0579	1	2	103	
5	0.1158	2	2	77	
6	0.0579	1	3	87	
7	0.1737	3	3	57	

^{a)}試験体内容積0.583 m³、^{b)}初期電圧設定値7 kV、短絡電流設定値23 kV及び
短絡時間設定値2 s、^{c)}測定誤差± 15 %

表A.4 金属母線の損耗量に関するHEAF試験データ（図2.10のデータ）

Table A.4 HEAF test data on metal bus bar loss (Data from Fig. 2.10)

テスト No.	母線 材質	電圧 ^{a), b)} (V)	電流 ^{c)} (A)	アーク放電 時間 ^{d)} (s)	アークエネ ルギー (J)	金属母線の 損耗量 (g)	備考
1	Cu	1238	23.7	0.106	4.5	51	基準試験体
2	Cu	843	22.8	0.519	14.0	388	基準試験体
3	Cu	828	22.3	1.06	24.6	857	基準試験体
4	Al	1105	23.8	0.106	3.9	37	基準試験体
5	Al	838	22.9	0.519	12.3	227	基準試験体
6	Al	811	22.3	1.06	23.2	595	基準試験体
7	Al	882	21.4	1.13	26.5	316	高圧電源盤

^{a)}初期電圧設定値7 kV、^{b)}線間電圧、^{c)}短絡電流設定値23 kV、

^{d)}短絡時間設定値0.1/0.5/1 s

付録 A：参考文献一覧

A-1 米国KEMA試験場のWebページ

<https://www.cesi.it/labs/chalfont/> (2025年1月16日確認)

A-2 原子力規制委員会、NRA 技術報告、「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」、NTEC-2016-1002、平成28年.

<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11235834/www.nsr.go.jp/data/000145383.pdf>

(2025 年 1 月 16 日確認)

付録 B. HEAF に関する規制情報等

B.1 HEAFの規制化の経緯

HEAFの規制化の経緯を以下に示す。

2011年3月11日	東北電力株式会社女川原子力発電所1号機にてHEAF事象発生 ^{B-1,B-2}
2013年1月	東北電力株式会社女川原子力発電所1号機の高圧電源盤を模擬したHEAF試験研究開始 ^{B-3}
2015年9月28日	第16回技術情報検討会にてHEAFに関する安全研究について報告 ^{B-4, B-5}
2015年10月7日	第32回原子力規制委員会にてHEAFに関する安全研究について報告 ^{B-6}
2016年3月	NRA技術報告 NTEC-2016-1002 (S/NRA/RのHEAF試験データ) 公表 ^{B-7}
2016年3月4日	第18回技術情報検討会にてアーク火災事象に対する原子力発電所の保護継電器設計上の問題点と今後の対応について審議 ^{B-8,B-9}
2016年7月11日	第20回技術情報検討会においてHEAFを要対応技術情報に指定 ^{B-10,B-11}
2016年8月	NUREG/IA-0470 Volume 1 (S/NRA/RのHEAF試験データ) 公表 ^{B-12}
2016年11月25日	第22回技術情報検討会においてHEAFに関する事業者ヒアリング状況および今後の対応について(案) 審議 ^{B-13,B-14}
2016年12月20日	第23回技術情報検討会においてHEAFに関する事業者ヒアリング状況および今後の対応について(案) 審議 ^{B-15,B-16}
2017年2月22日	第62回原子力規制委員会にて高エネルギーアーク損傷に係る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等の一部改正等並びにそれらの意見募集等について審議 ^{B-17}
2017年6月13日	第1回(高エネルギーアーク損傷)新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合 ^{B-18}
2017年6月27日	第2回(高エネルギーアーク損傷)新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合 ^{B-19}
2017年7月19日	第25回原子力規制委員会にて高エネルギーアーク損傷(HEAF)に係る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等の改正等について審議 ^{B-20}
2017年8月8日	高エネルギーアーク損傷(HEAF)に係る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等の改正等(火災発生防止対策の規制への取込) ^{B-20}
2018年10月15日	第3回(高エネルギーアーク損傷)新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合 ^{B-21}
2021年10月	NUREG/IA-0470 Volume 2 (S/NRA/RのHEAF試験データ) 公表 ^{B-22}

B.2 事業者との面談

HEAFの規制化に係る事業者との主な面談を以下に示す。

2016年4月20日	高エネルギーアーク火災に関する面談 ^{B-23}
2016年6月23日	高エネルギーアーク火災に関する面談 ^{B-24}
2016年7月21日	高エネルギーアーク火災に関する面談 ^{B-25}
2016年7月29日	高エネルギーアーク火災に関する加工施設業者との面談 ^{B-26}
2016年8月1日	高エネルギーアーク火災に関するJAEAとの面談 ^{B-27}
2016年8月1日	高エネルギーアーク火災に関する京都大学との面談 ^{B-28}
2016年8月1日	高エネルギーアーク火災に関する日本原燃との面談 ^{B-29}
2016年8月3日	高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談 ^{B-30}
2016年9月5日	高エネルギーアーク損傷に関する国立研究開発法人日本原子力研究開発機構との面談 ^{B-31}
2016年9月21日	高エネルギーアーク損傷に関する国立研究開発法人日本原子力研究開発機構との面談 ^{B-32}
2016年9月27日	高エネルギーアーク火災に関するBWR 事業者との面談 ^{B-33}
2016年9月27日	高エネルギーアーク火災に関するPWR 事業者との面談 ^{B-34}
2016年10月17日	高エネルギーアーク火災に関する面談 ^{B-35}
2016年10月19日	高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談 ^{B-36}
2016年11月9日	高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談 ^{B-37}
2016年12月14日	高エネルギーアーク火災に関する日本原燃との面談 ^{B-38}
2016年12月21日	高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談 ^{B-39}
2016年12月26日	高エネルギーアーク損傷に関する国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（再処理施設）との面談 ^{B-40}
2017年1月13日	高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談 ^{B-41}
2017年1月20日	高エネルギーアーク火災に関するJAEA（もんじゅ）との面談 ^{B-42}
2017年1月25日	高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談 ^{B-43}
2017年2月8日	高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談 ^{B-44}
2017年2月28日	高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談 ^{B-45}
2017年3月9日	高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談 ^{B-46}
2017年3月17日	高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談 ^{B-47}
2017年3月31日	高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談 ^{B-48}
2017年4月11日	高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談 ^{B-49}
2017年4月20日	高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談 ^{B-50}
2017年4月21日	高エネルギーアーク損傷に関する女川原子力発電所の視察 ^{B-51}
2017年4月28日	高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談 ^{B-52}
2017年5月15日	高エネルギーアーク火災に関するJAEA（もんじゅ）との面談 ^{B-53}

2017年5月16日	高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談 ^{B-54}
2017年5月23日	高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談 ^{B-55}
2017年6月1日	高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談 ^{B-56}
2017年6月15日	高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談 ^{B-57}
2017年6月23日	高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談 ^{B-58}
2017年12月15日	高エネルギーアーク損傷対策に伴う手続きについての面談 ^{B-59}

B.3 OECD/NEA HEAFプロジェクト

OECD/NEA HEAFプロジェクトの情報は、以下のWebページで公開されている^{B-60}。

High Energy Arcing Fault Events (HEAF) Project Ongoing

Joint project

A cabinet containing copper bus before the HEAF test (left) and after the test(right). Source: NRC

Massive electrical discharges, referred to as high energy arcing faults (HEAF), have occurred in nuclear power plant switching off components throughout the world. These incidents have been increasing because of ageing infrastructures and growing energy demand. Co-ordinated by the US Nuclear Regulatory Commission (NRC), the HEAF Project was initiated in 2012 to perform experiments on a variety of electrical cabinets in order to obtain scientific data on HEAF phenomena through carefully designed experiments. Phase 1 of the HEAF project was completed in 2016. The report concluded with recommendations for areas requiring further testing, in particular to better understand the importance of specific variables such as bus bar material, operating voltage, current and arc duration on the severity of the HEAF.

In February 2017, an International Phenomena Identification and Ranking Table (PIRT) exercise was held to identify phenomena of the highest importance with the least amount of knowledge available on HEAF events. This exercise tentatively identified aluminium oxidation, pressure effects, the characteristics of target structures and mitigating factors (e.g. HEAF shields) as being areas for further research. Discussions were completed with representatives from ten partners in nine countries to initiate a second phase of the project. The current, second phase of the project (2019-2024) comprises electrical enclosures and bus ducts tests. Electrical enclosure tests have been designed using the same enclosure configuration for repeatability and based on typical plant design for representativeness. Some of the enclosures were dismantled from nuclear power plants under decommissioning to be tested in the project. The bus bar tests were designed for a known and reliable arc location and plasma ejection direction. Due to the COVID-19 pandemic, first tests had been postponed to the middle of 2022. A first series of six tests was conducted at the end of August 2022 together with additional domestic tests. The focus of these tests was on bus bar and bus duct, comparing material effect between aluminium and copper.

Participants
Belgium, Canada, France, Germany, Japan, Korea, Netherlands, Spain and United States.

Project period
February 2019-June 2024

Budget
EUR 2.38 million

Contacts
MARKUS BEILMANN

Tags
DSME, Electrical systems, Fuel cycle facility safety, Nuclear safety research, Risk assessment, Safety of electrical systems

図 B.1 OECD/NEA HEAF プロジェクトの情報

Fig. B.1 Information on the OECD/NEA HEAF Project

出典) OECD/NEA HEAFプロジェクトのWebページ^{B-60}

B.4 米国NRCのHEAF研究

米国NRCのHEAF研究に関する情報は、以下のWebページで公開されている^{B-61}。

The screenshot displays the U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) website. The header includes the NRC logo, navigation links (FAQ, AGREEMENT STATES, FACILITY LOCATOR, WHAT'S NEW, SITE HELP, INDEX A-Z, CONTACT US, EMAIL UPDATES), a 'REPORT A SAFETY CONCERN' button, and a search bar. Below the header is a dark blue navigation bar with links to NUCLEAR REACTORS, NUCLEAR MATERIALS, RADIOACTIVE WASTE, NUCLEAR SECURITY, PUBLIC MEETINGS & INVOLVEMENT, NRC LIBRARY, and ABOUT NRC. The main content area features a breadcrumb trail: Home > About NRC > How We Regulate > Research > Fire Research Program. On the left is a 'Navigation' sidebar with links to Fire Research Projects, Collaborative Research, and NRC High Energy Arc Fault (HEAF) Research. The main heading is 'NRC High Energy Arc Fault (HEAF) Research'. Below it is a 'Recent News / Upcoming Events' section with three news items: 1) June 6th, 2023: Presentations from the NRC/EPRI HEAF Workshop are available in ADAMS (ML23150A023). 2) April 30th, 2023: The NRC's Office of Nuclear Regulatory Research has published NUREG-2262, 'High Energy Arcing Fault Frequency and Consequence Modeling.' 3) March 29th, 2023: The NRC's Office of Nuclear Regulatory Research will be hosting a public workshop on high energy arcing faults on May 17th and 18th. Below the news section is a 'Spotlight' section with a dropdown menu labeled 'Choose a Section'.

図 B.2 米国 NRC における HEAF 研究

Fig. B.2 NRC HEAF research

出典) 米国NRCにおけるHEAF研究のWebページ^{B-61}

付録 B：参考文献一覧

- B-1 東北電力株式会社、「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」、東北電力株式会社報告資料、平成23年.
- B-2 「【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-M011Rev.4.
<http://www.nucia.jp/nucia/kn/KnTroubleView.do?troubleId=11314>
（2025 年 1 月 16 日確認）
- B-3 独立行政法人原子力安全基盤機構、「火災防護対策の高度化に係る調査・試験」、安全研究年報（平成 24 年度）、JNES-RE-2013-0001-Rev.1、pp. 369-376、平成 25 年.
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10207746/www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000125907.pdf>（2025 年 1 月 16 日確認）
- B-4 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、「高エネルギーアーク損傷（HEAF）に関する安全研究について（トピックス①）」、第16回技術情報検討会、資料16-6、平成27年.
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www.nra.go.jp/data/000125423.pdf>
（2025年1月16日確認）
- B-5 原子力規制庁、第16回技術情報検討会議事概要、第16回技術情報検討会、平成27年.
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www.nra.go.jp/data/000125424.pdf>
（2025年1月16日確認）
- B-6 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷（HEAF）に関する安全研究について（中間報告）」、第 32 回原子力規制委員会、資料 2、平成 27 年.
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11235834/www.nsr.go.jp/data/000125486.pdf>
（2025年1月16日確認）
- B-7 原子力規制委員会、NRA技術報告、「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」、NTEC-2016-1002、平成28年.
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11235834/www.nsr.go.jp/data/000145383.pdf>
（2025 年 1 月 16 日確認）
- B-8 原子力規制庁原子力規制部原子力規制企画課、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、「アーク火災事象に対する原子力発電所の保護継電器設計上の問題点と今後の対応」、第18回技術情報検討会、資料18-7、平成28年.
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www.nra.go.jp/data/000144565.pdf>
（2025年1月16日確認）
- B-9 原子力規制庁、第18回技術情報検討会議事概要、第18回技術情報検討会、平成28年.
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www.nra.go.jp/data/000144575.pdf>
（2025年1月16日確認）

- B-10 原子力規制庁原子力規制部原子力規制企画課、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、「高エネルギーアーク損傷（HEAF）に関する対応方針について（案）」、第20回技術情報検討会、資料20-5、平成28年。
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www.nra.go.jp/data/000158359.pdf>（2025年1月16日確認）
- B-11 原子力規制庁、第20回技術情報検討会議事概要、第20回技術情報検討会、平成28年。
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www.nra.go.jp/data/000166939.pdf>（2025年1月16日確認）
- B-12 Tsuchino, S., Kabashima, H., Turner, S., Mehta, S., Stroup, D., Melly, N., Taylor G., and Gonzalez, F., “Nuclear Regulatory Authority Experimental Program to Characterize and Understand High Energy Arcing Fault (HEAF) Phenomena”, NUREG/IA-0470 Volume 1, August 2016.
<https://www.nrc.gov/docs/ML1623/ML16235A163.pdf>（2025年1月16日確認）
- B-13 原子力規制庁長官官房技術基盤グループ技術基盤課、原子力規制部原子力規制企画課、「高エネルギーアーク損傷（HEAF）に関する事業者ヒアリング状況および今後の対応について（案）」、第22回技術情報検討会、資料22-4、平成28年。
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www.nra.go.jp/data/000172822.pdf>（2025年1月16日確認）
- B-14 原子力規制庁、第22回技術情報検討会議事概要、第22回技術情報検討会、平成28年。
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www.nra.go.jp/data/000172823.pdf>（2025年1月16日確認）
- B-15 原子力規制庁長官官房技術基盤課、原子力規制部原子力規制企画課、「高エネルギーアーク損傷（HEAF）に関する事業者ヒアリング状況および今後の対応について（案）」、第23回技術情報検討会、資料23-3、平成28年。
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www.nra.go.jp/data/000173087.pdf>（2025年1月16日確認）
- B-16 原子力規制庁、第23回技術情報検討会議事概要、第23回技術情報検討会、平成28年。
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www.nra.go.jp/data/000173894.pdf>（2025年1月16日確認）
- B-17 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に係る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等の一部改正等並びにそれらの意見募集等について（案）」、第62回原子力規制委員会、資料2、平成29年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11402581/www.nsr.go.jp/data/000179744.pdf>

- (2025 年 1 月 16 日確認)
- B-18 電気事業連合会、「HEAF 火災規制化（新知見）に対する事業者の取組み状況および今後の対応について」、原子力規制庁第 1 回（高エネルギーアーク損傷）新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合、資料 1-4、平成 29 年。
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA022011488?contents=NRA022011488-002-006#pdf=NRA022011488-002-006>（2025 年 1 月 16 日確認）
- B-19 電気事業連合会、「アーク火災対策規制化に対する事業者回答について」、原子力規制庁第 2 回（高エネルギーアーク損傷）新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合、資料 2-2、平成 29 年。
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA022011489?contents=NRA022011489-002-003#pdf=NRA022011489-002-004>（2025 年 1 月 16 日確認）
- B-20 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に係る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等の一部改正等について（案）」、第 25 回原子力規制委員会、資料 1、平成 29 年。
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA001001439?contents=NRA001001439-002-002>
(2025 年 1 月 16 日確認)
- B-21 電気事業連合会、「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組み状況について」、原子力規制庁第 3 回（高エネルギーアーク損傷）新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合、資料 3-2、平成 30 年。
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA022011490?contents=NRA022011490-002-004>
(2025 年 1 月 16 日確認)
- B-22 Kabashima, H., Kasahara, F., Eguchi, H., Mehta, S., Stroup, D., Melly, N., and Turner, S., “Nuclear Regulatory Authority Experimental Program to Characterize and Understand High Energy Arcing Fault (HEAF) Phenomena”, NUREG/IA-0470 Volume 2, 2021.
<https://www.nrc.gov/docs/ML2129/ML21295A537.pdf>（2025 年 1 月 16 日確認）
- B-23 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000149757.pdf>
(2025 年 1 月 16 日確認)
- B-24 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000156047.pdf>
(2025 年 1 月 16 日確認)
- B-25 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000160167.pdf>

- (2025年1月16日確認)
- B-26 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する加工施設業者との面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000160151.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-27 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する JAEA との面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000160154.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-28 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する京都大学との面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000160157.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-29 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する日本原燃との面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000160159.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-30 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000160156.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-31 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に関する国立研究開発法人日本原子力研究開発機構との面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000164492.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-32 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に関する国立研究開発法人日本原子力研究開発機構との面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000164644.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-33 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する BWR 事業者との面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000166162.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-34 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する PWR 事業者との面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000166165.pdf>

- (2025年1月16日確認)
- B-35 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000166993.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-36 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000168240.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-37 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000170601.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-38 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する日本原燃との面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000173243.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-39 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000175071.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-40 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に関する国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（再処理施設）との面談」、被規制者等との面談記録、平成 28 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000174464.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-41 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000175818.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-42 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する JAEA（もんじゅ）との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000189015.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-43 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000176637.pdf>

- (2025年1月16日確認)
- B-44 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000178429.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-45 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000188116.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-46 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000189308.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-47 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000189323.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-48 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する電事連との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000184327.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-49 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000190931.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-50 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000193477.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-51 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に関する女川原子力発電所の視察」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000193481.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-52 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000227712.pdf>

- (2025年1月16日確認)
- B-53 原子力規制庁、「高エネルギーアーク火災に関する JAEA（もんじゅ）との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000189417.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-54 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000218317.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-55 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000218343.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-56 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000218366.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-57 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000197139.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-58 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷に関する電気事業連合会等との面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11837181/www.nsr.go.jp/data/000218379.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-59 原子力規制庁、「高エネルギーアーク損傷対策に伴う手続きについての面談」、被規制者等との面談記録、平成 29 年。
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12310939/www2.nsr.go.jp/data/000219700.pdf>
- (2025年1月16日確認)
- B-60 OECD/NEA HEAF プロジェクトの Web ページ
https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_24977/high-energy-arcing-fault-events-heaf-project
- (2025年1月16日確認)
- B-61 米国 NRC における HEAF 研究の Web ページ
<https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/research/fire-research/heaf-research.html>
- (2025年1月16日確認)

執筆者一覧

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 技術基盤課（システム安全研究部門併任）
 梶島 一 首席技術研究調査官

