

制定 平成29年7月19日 原規技発第1707196号 原子力規制委員会決定

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について
次のように定める。

平成29年7月19日

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の制定について

原子力規制委員会は、高エネルギーアーク損傷（HEAF）に係る電気盤の設計に関する審査ガイドを別添のとおり定める。

附 則

この規程は、再処理施設の設計及び工事の方法の技術基準に関する規則等の一部を改正する規則の施行の日（平成29年8月8日）より施行する。

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

平成29年7月

原子力規制委員会

目次

1. 総則	1
1. 1 目的	1
1. 2 適用範囲	1
1. 3 用語の定義	1
2. アーク放電を発生させる試験	2
2. 1 電気盤の選定	2
2. 2 短絡電流の目標値	3
2. 3 HEAF 試験に用いる電気回路	3
2. 4 測定項目	3
2. 5 アーク放電の発生方法	4
2. 6 アーク放電の継続時間	4
2. 7 HEAF 試験の実施	4
2. 8 アークエネルギーの計算	5
3. アーク火災発生の評価	5
3. 1 アーク火災発生の評価の概要	5
3. 2 評価に用いる必要なデータ	6
3. 3 アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値に係る評価	6
3. 4 しきい値に係る解析による評価	6
4. HEAF に係る対策の判断基準	6
5. 文献	8
付録 A HEAF 試験に用いる電気回路の一例	9
付録 B 電気盤周囲の熱流束の測定位置の一例	10
付録 C 熱流束測定結果の一例	11
付録 D アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値に係る評価の例	12
付録 E 原子力規制庁の HEAF 試験結果の一例	13

1. 総則

1. 1 目的

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¹第45条第3項1号では、保安電源設備について、電線路、発電用原子炉施設において常時使用される発電機及び非常用電源設備から安全施設への電力の供給が停止することがないように、高エネルギーのアーク放電による電気盤の損壊の拡大を防止するため必要な措置を講じることを求めている。

高エネルギーアーク損傷（以下「HEAF」²という。）は、これまでに国内外の原子力発電所の電気盤等で発生しており、電気盤内外のケーブルや隣接する電気設備等に重大な損傷をもたらしている。高エネルギーのアーク放電（以下単に「アーク放電」という。）の継続により、電気盤や隣接する電気設備等に火災（以下「アーク火災」という。）が発生する事例もあることから、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³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によって、保安電源設備の信頼性をより向上させる必要がある⁴。

本ガイドは、電気盤においてアーク火災の発生を防止するための、遮断器の遮断時間について、その妥当性を審査官が判断するための考え方の一例を示すものである。

1. 2 適用範囲

本ガイドは、実用発電用原子炉施設⁵の保安電源設備のうち、重要安全施設⁶への電力供給に係る電気盤及び当該電気盤に影響を与えるおそれのある電気盤（安全施設⁷（重要安全施設を除く。）への電力供給に係るものに限る。）の遮断器の遮断時間の設計に適用する。研究開発段階発電用原子炉施設⁸及び再処理施設⁹については、本ガイドを参考にする。

1. 3 用語の定義

本ガイドにおける用語の定義は、次のとおりである。

(1) 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¹⁰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¹⁰。パワーセンタとモータコントロールセンタの2種類がある。パワー

¹ 平成25年原子力規制委員会規則第6号

² High Energy Arcing Fault

³ アーク放電初期に発生する爆発現象に関しては、今後、更なる知見の蓄積により、より広範囲への考慮が必要とされた場合に、さらなる規制基準等の見直しを行うものとする。

⁴ 引用文献（1）

⁵ 実用発電用原子炉及びその附属施設

⁶ 安全施設のうち、安全機能の重要度が特に高い安全機能を有するもの（実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則第2条第2項第9号）

⁷ 設計基準対象施設のうち、安全機能を有するもの（実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則第2条第2項第8号）

⁸ 研究開発段階発電用原子炉及びその附属施設

⁹ 再処理設備及びその附属施設

¹⁰ 電気設備に関する技術基準を定める省令（制定：平成9年3月27日号外通商産業省令第52号）

センタは、中容量の負荷及びモータコントロールセンタに電力を供給するもの、モータコントロールセンタは、小容量の負荷に電力を供給するもの。)をいう。

(2) アーク放電

大電流の放電(数十メガジュール程度)であって、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絶縁破壊(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。

(3) アークパワー

アーク放電時の電流と電圧の積(三相合計の積算値)。単位はワット(W)である。

(4) アークエネルギー

アークパワー(W)をアーク放電の継続時間(s)で積分した値。単位はジュール(J)である。

(5) アーク火災

アーク放電の継続により、電気盤や隣接する電気設備等に発生する火災。

火災は、アーク放電の熱による電気盤内の温度上昇、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。(発生までの時間は数十秒から数分。)

(6) 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。

(7) HEAF

遮断器や開閉器等の通電された導体間又は通電された導体とアースとの間にアーク放電が発生し、熱、光、金属ヒューム及びアーク放電の発生箇所周辺の急激な圧力上昇を伴う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及びこれに伴い発生する火災。

HEAFの第1段階では、爆発により機器の損壊、変形等の故障が発生する。アーク放電に起因する熱の影響により、機器等が高温になる場合、第2段階として、アーク火災が発生する。

2. アーク放電を発生させる試験

電気盤でアーク火災が発生するかどうかを判断するためには、アーク放電を発生させる試験(以下「HEAF試験」という。)を実際に行う必要がある。(解説-1)

本章では、HEAF試験の試験条件の設定に関する確認事項を示す。

(解説-1) HEAF試験の実施について

アーク火災評価には、アークエネルギー[J]及びアーク放電の継続時間[s]を用いることから、これらのデータをHEAF試験により得る必要がある。なお、これらのデータについては、信頼性のある試験(事業者自らが直接行った試験に限らない。)に基づくものであることを確認すること。

2.1 電気盤の選定

実用発電用原子炉施設内の電気は、原子炉運転中においては主発電機からの電力の一部が変

圧器によって降圧された後、高圧電源盤及び低圧電源盤を介してモータ等に供給されている。HEAF 試験に用いられる電気盤は、実際に所内で使用されているものと同等の高圧電源盤及び低圧電源盤が選定されていることを確認する。

2. 2 短絡電流の目標値

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。各電気盤の短絡電流値は、電気系統の設計時に設定されている値を踏まえて、設定されていることを確認する。(解説-2)

なお、HEAF 試験に用いる電気盤の受電側に印加する電圧については、電気盤の実使用条件である定格電圧値を踏まえて、初期の印可電圧を設定していることを確認する。

(解説-2) 一般的な電気盤における短絡電流値の算出方法について

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される。

まず、変圧器二次側の定格電流 I_0 は、三相短絡容量 W 及び定格電圧 V_0 から次のように求められる。

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

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

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 Z 及び定格電流 I_0 から次のように求められる。

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

I_b : 三相の短絡電流[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、短絡電流の計算に使用されるものである。

2. 3 HEAF 試験に用いる電気回路

HEAF 試験に用いる電気回路は、付録 A に示す電気回路又は同等の電気回路を用いていることを確認する。

2. 4 測定項目

HEAF 試験において電圧電流波形が測定されていることを確認する。具体的な測定項目、測定目

的及び測定方法を表1に示す。(参考-1)

表1 HEAF試験の測定項目等

測定項目	測定目的	測定方法
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する。

(参考-1) その他の測定項目

本ガイドの適用範囲である、遮断器の遮断時間の設計に用いるものではないが、HEAF試験において、火災の影響と同時に爆発の影響も評価する場合には、表1の測定項目のほか、HEAFを詳細に把握するため、電気盤周囲の熱流束(NUREG/CR-6850¹¹に規定されるZOI¹²(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(付録B参照)の境界線上を含む複数箇所に熱流束計を設置して測定する。)、電気盤内圧力、電極の損耗量(例えば、電極の重量減)、衝撃波(例えば、電気盤内の圧力及び電気盤外の音圧)、電磁力、電気盤内温度、赤外線カメラや高速度カメラによる動画等のデータも同時に取得していることが望ましい。

2.5 アーク放電の発生方法

アーク放電を発生させる試験が、電気盤の遮断器の受電側及び配電側で実施されていることを確認する。アーク放電は、IEEE C37.20.7-2007¹³等¹⁴に基づき、母線に導電性針金をワイヤリングした後、2.2から2.4の試験条件で大電流を流し三相短絡させて発生させていることを確認する。

2.6 アーク放電の継続時間

アーク放電の継続時間を設定する際には、所内で実際に使用している継電器の設定時間を踏まえ、目標とするアークエネルギーの値が得られるよう、設定されていることを確認する。また、HEAF試験により得られた電圧電流波形から、アーク放電の継続時間を求めていることを確認する。

2.7 HEAF試験の実施

HEAF試験は2.1で選定した電気盤を用いて実施されていることを確認する。初期の電圧及び電流値として2.2で設定した値が用いられていることを確認する。また、HEAF試験時の電圧及び電流値は電気盤よりも受電側で測定されていることを確認する。さらに、アーク放電の継続時間を変化させ、アーク火災が発生する場合としない場合の、それぞれのアーク放電の継

¹¹ 米国の場合、電気盤内で発生する一般的な火災の盤外への影響範囲は、電気盤の上部では1.5m、前面及び側面では0.9m離れた位置とされている。(引用文献(2))

¹² Zone of Influence

¹³ 引用文献(3)

¹⁴ 引用文献(4)

続時間が得られていることを確認する。

2. 8 アークエネルギーの計算

HEAF 試験におけるアークエネルギー (J) は、アークパワー (W) をアーク放電の継続時間 (s) で積分した値としていることを確認する。

3. アーク火災発生の評価

HEAF 試験では通常、アーク放電発生時に金属ヒューム等が発生し、その一部は電気盤外へ漏えいする。アーク放電が終了し、金属ヒューム等の電気盤外への漏えいが収まった後に、アーク放電の熱により機器等が高温になり、アーク火災が発生する可能性がある。(図1)



図1 HEAF 試験状況

3. 1 アーク火災発生の評価の概要

電気盤においてアーク火災が発生する場合には、アーク放電発生の数十秒から数分後に目視により確認できる。また、電気盤周囲の熱流束を測定することによってもアーク火災の発生を確認できる。(付録C参照)

アーク火災発生の有無とアークエネルギーの関係を評価することにより、アーク火災が発生する場合の電気盤固有のアークエネルギーのしきい値を求めることができる。

3. 2 評価に用いる必要なデータ

アーク火災評価には、アークエネルギー[J]及びアーク放電の継続時間[s]を用いる。なお、これらのデータについては、信頼性のある試験（事業者自らが直接行った試験に限らない。）に基づくものであることを確認すること。（解説－1）

3. 3 アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値に係る評価

電気盤においてアーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値（以下単に「しきい値」という。（解説－3））を求める際には、アーク火災発生の有無とその時のアークエネルギーとの関係の評価する。しきい値が、HEAF 試験においてアーク火災が発生しなかった場合の最大のアークエネルギー値となっていること及びアーク火災が発生した全てのアークエネルギー値を下回っていることを確認する。ただし、HEAF 試験の結果、火災の発生に至らないと判断された場合は、しきい値の算定は不要である。（解説－4）

（解説－3）しきい値

アーク火災が発生する場合の電気盤固有の真のしきい値（実際に火災が発生するしきい値）は、アーク火災が発生した時の値と発生しなかった時の値の間に存在する。（付録D 参照）

（解説－4）火災の発生に至らないと判断された場合について

HEAF 試験の結果、アーク火災の発生に至らない場合がある（例えば、小型の電気盤などにおいて内部の構成部品が吹き飛び、通電できなくなることでアークエネルギーが比較的小さい値になる等）。この様な場合には、しきい値が存在しないことから、その算定は不要とする。

3. 4 しきい値に係る解析による評価

しきい値については、HEAF 試験の結果に基づく解析によって評価してもよい。その際には、電気盤内の空間容積や密閉性、定格電圧や短絡電流値の大小等を考慮した条件設定が行なわれていることを確認する。（解説－5）

（解説－5）空間容積や密閉性の考慮の必要性

過去に原子力規制庁が実施した HEAF 試験において、電気盤内の空間容積や密閉性によって、アーク火災の発生に必要なアークエネルギーが大きく異なることが示された。これより、アーク火災の発生に必要なアークエネルギーは、電気盤内の空間容積の大小や密閉性の高低と関係するといえる。（付録E 参照）

4. HEAF に係る対策の判断基準

実用発電用原子炉施設の保安電源設備のうち、重要安全施設への電力供給に係る電気盤及び当該電気盤に影響を与えるおそれのある電気盤（例えば、2.5m 以内にあるもの（解説－6））の遮断器の遮断時間が、3. 3 又は 3. 4 において評価したしきい値に対応するアーク放電の継続時間と比べ、小さい値となっていることを確認する。ただし、短絡等が起きたとしても非常に短時間

(例えば、0.1 秒以下) で電気盤への電力供給を止めることができる場合 (例えば、受電側に短絡継電器が設置されている等) や、火災の発生に至らないと判断された場合は、適切に遮断されていると判断してもよい。(解説－4)

また、その際に、当該電気盤内の遮断器だけでなく、当該電気盤の受電側の遮断器についても、同様にその他必要な対策 (参考－2) を含め、確認する。

(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

米国においては、火災防護の要求として、ケーブル処理室でのケーブルトレイの水平距離を 0.9m 以上離すとしている¹⁵。また、平成 23 年の東北地方太平洋沖地震の際に女川原子力発電所において発生したアーク火災において、水平距離 2.5m より離れた電気盤には HEAF の影響が及んでいなかったことを踏まえ、影響を与えるおそれのある範囲の目安として、2.5m 以内にあるものとした。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。

(参考－2) 火災感知設備及び消火設備

火災防護審査基準¹⁶は、

- ・火災感知設備について、取付面高さ、温度、湿度、空気流等の環境条件や予想される火災の性質を考慮して型式を選定し、早期に火災を感知できる場所に設置すること
- ・消火設備について、火災の火炎、熱による直接的な影響のみならず、煙、流出流体、断線、爆発等による二次的影響が安全機能を有する構築物、系統及び機器に悪影響を及ぼさないように設置すること

を求めている。火災感知設備及び消火設備については、HEAF が発生した場合を配慮して配置されていることを確認する必要がある。

¹⁵ 米国 NRC の Regulatory Guide 1.189 Fire Protection for Nuclear Power Plants では、ケーブル処理室のケーブルトレイ間は少なくとも水平距離 0.9m、垂直距離 1.5m 分離すること、とされている。

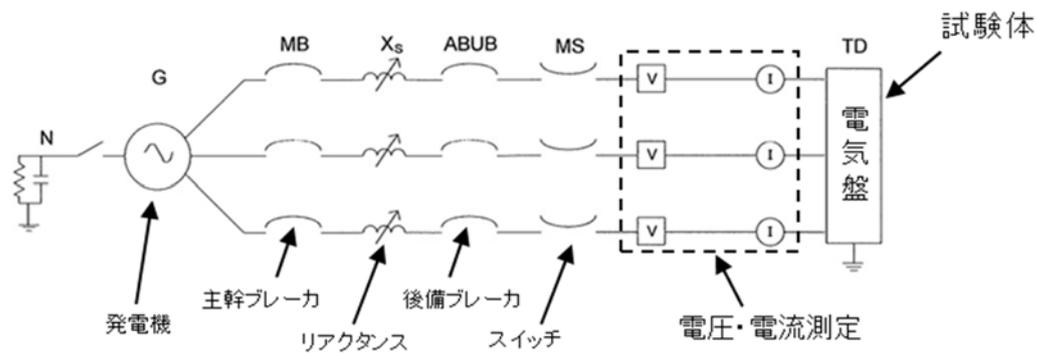
¹⁶ 「実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準」(原規技発第 1306195 号(平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定))

5. 文献

本ガイドは、以下の資料を引用及び参考としている。

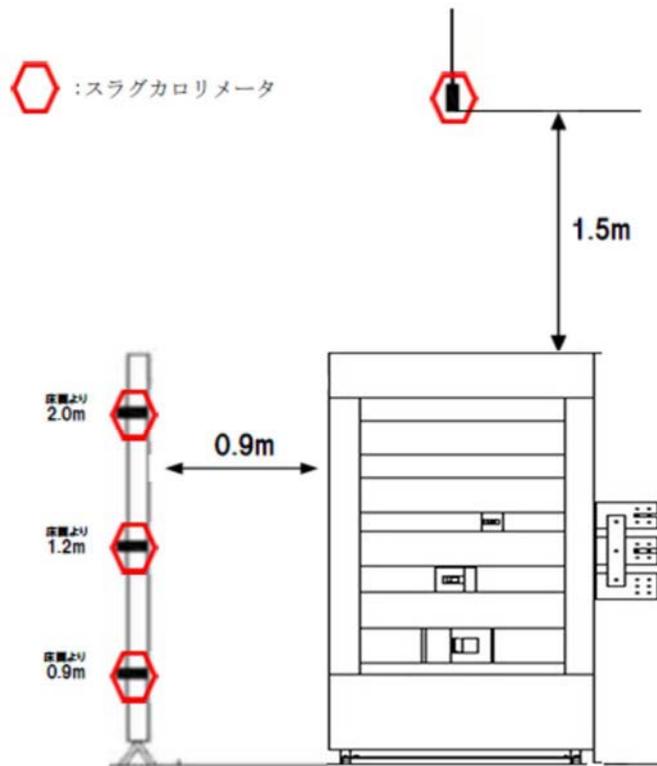
- 引用文献 (1) 椛島一、土野進、“原子力発電所における高エネルギーアーク損傷 (HEAF) に関する分析”、NRA 技術報告書 NTEC-2016-1002、2016 年 3 月
- 引用文献 (2) EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities
NUREG/CR-6850, EPRI 1011989, September 2005
- 引用文献 (3) IEEE C37.20.7-2007 “IEEE Guide for Testing Metal-Enclosed Switchgear Rated Up to 38 kV for Internal Arcing Faults”
- 引用文献 (4) IEC62271-200 High-voltage switchgear and controlgear - Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV (International Electrotechnical Commission)
- 参考文献 (1) 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
- 参考文献 (2) S. Tsuchino, H. Kabashima, S. Turner, S. Mehta, D. Stroup, N. Melly,
G. Taylor and F. Gonzalez, “Nuclear Regulatory Authority Experimental Program to Characterize and Understand High Energy Arcing Fault (HEAF) Phenomena Volume 1,” NUREG/IA-0470, August 2016
- 参考文献 (3) Sandia National Laboratories (SNL), SANDIA REPORT,
“High Energy Arcing Fault Fires in Switchgear Equipment, A Literature Review,” SAND2008-4820, February 2009

付録A HEAF 試験に用いる電気回路の一例



出典：引用文献（1）

付録B 電気盤周囲の熱流束の測定位置の一例



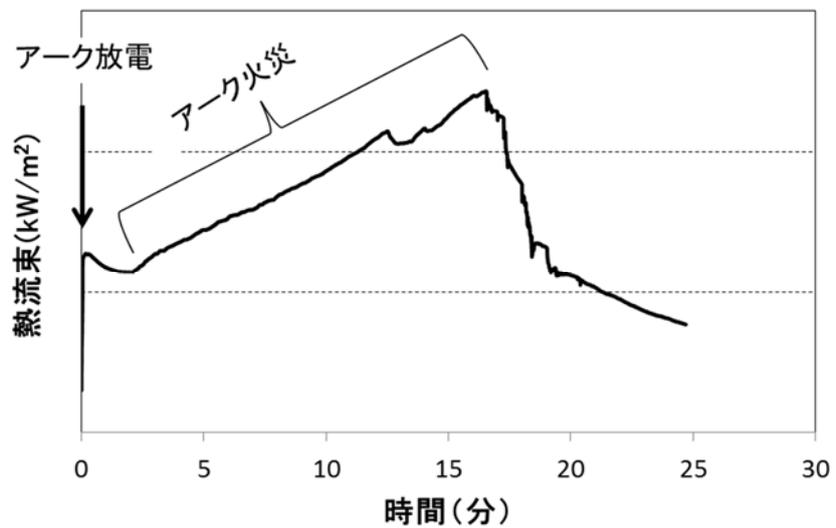
適切に ZOI 境界線上の熱流束データを取得するため、電気盤に応じて測定位置を設定する。

出典：引用文献（1）

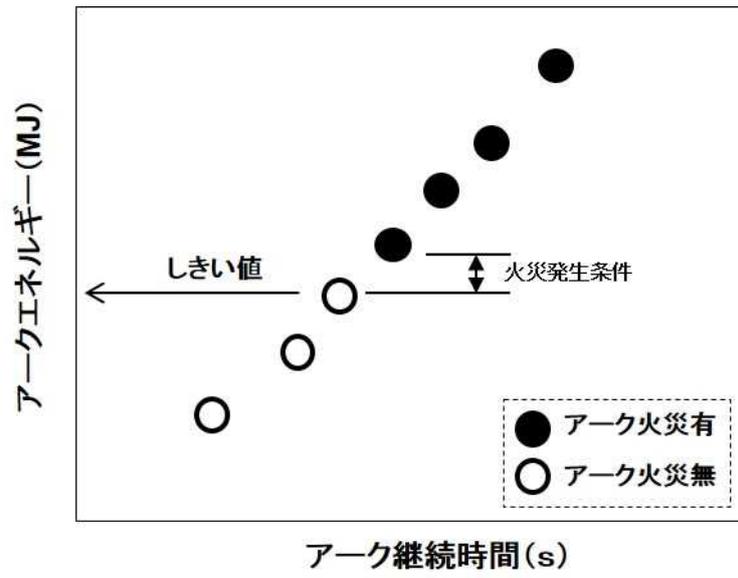
付録C 熱流束測定結果の一例

(測定位置：電気盤上部 1.5m)

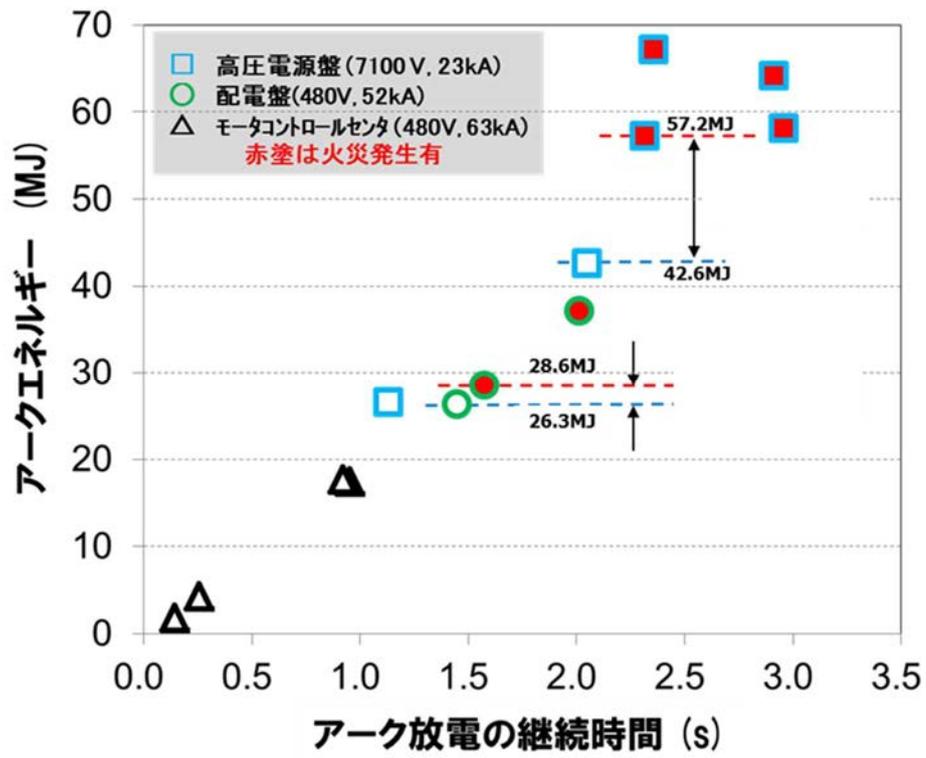
アーク火災が発生する場合には、アーク放電の発生後に熱流束の上昇が認められる。



付録D アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値に係る評価の例



付録 E 原子力規制庁の HEAF 試験結果の一例



出典：引用文献（1）