



「アークフラッシュ検討の手順」を中心に見直し
(2020年5月)

第25回 ETAP ユーザー会
December 4, 2014

アーク事故

気中で短絡事故や
地絡事故が起こると

👉アークフラッシュ!!



Photograph by Square D/Schneider Electric

アークフラッシュ!!

- 設備に損傷
- 感電
- 爆発
- 破片の飛散
- 人間を吹き飛ばす爆風
- 聴覚にダメージを与える音波
- 失明の危険のある閃光
- 発火源となるプラズマおよび熱

👉労働災害!!



Photograph by Square D/Schneider Electric

労働災害!!

アメリカでは、この規定を遵守
しない場合、**OSHA** (米国労働安全衛生局)、**NEC** (全米
電気設備基準)等によって刑事
罰や高額罰金が事業者に
課せられます。

👉アークフラッシュの検討!!



Photograph by Square D/Schneider Electric

関連規格および規定

アークフラッシュ検討に関する規定・規格

- National Fire Protection Agency (NFPA) 70E - 2018
- IEEE Standards 1584 - 2002 ,
IEEE 1584a - 2004, IEEE1584b - 2011
IEEE Standards 1584 - 2018
- CSA Z462 - 2015, CSA Z462 - 2018

(ETAP は、これらの規格に基づいてアークフラッシュの検討を行います)

ETAP User Group - No.25



NFPA 70E

Standard For Electrical Safety In The Workplace

もともとOSHAの要求で規定されたNFPA 70Eは、アークフラッシュ、アークプラスト、および直流 (dc) システムの危険の影響に関する最新情報、および電気設計と個人用保護具 (PPE) の適用に対応しています。

IEEE 1584

IEEE Guide For Performing Arc-Flash Hazard Calculations

IEEE 1584 は、208 V~15 kVの三相交流 (ac) 用の電気機器および導体が含まれシステムの検討に対応しています。単相 ac システムおよび直流 (dc) システムの検討は、このガイドの一部ではありませんが、これらのアプリケーション用にいくつかのガイダンスとリファレンスが提供されています。このガイドには、アークフラッシュの危険を緩和するための個人用保護具 (PPE) に関する推奨事項は規定されていません。

CSA Z462

Workplace Electrical Safety (カナダのアークフラッシュ関連の規定です)

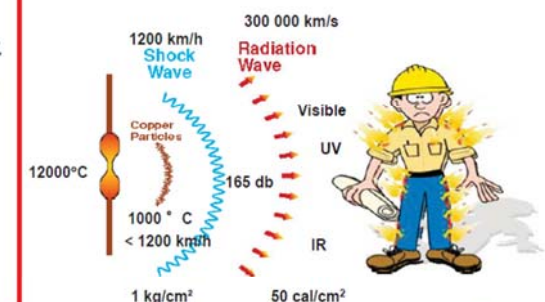
アーク・フラッシュの危険性

大きな電流が流れ、大きなエネルギーを取り扱う電気設備では、短絡(ショート)が起きると一瞬にして多量の熱が集中し、爆発的で大きな火花が発生

アーク爆発が引き起こすリスク

- ◆ 皮膚障害(2度、3度火傷)
放射熱エネルギー、対流熱エネルギー、プラズマ、熔融金属飛沫
- ◆ 聴覚障害
衝撃波による音響と圧力
- ◆ 呼吸障害
熱、煙、フューム

アーク爆発のときに起こる事象



PERFORM WHEN THE HEAT'S ON

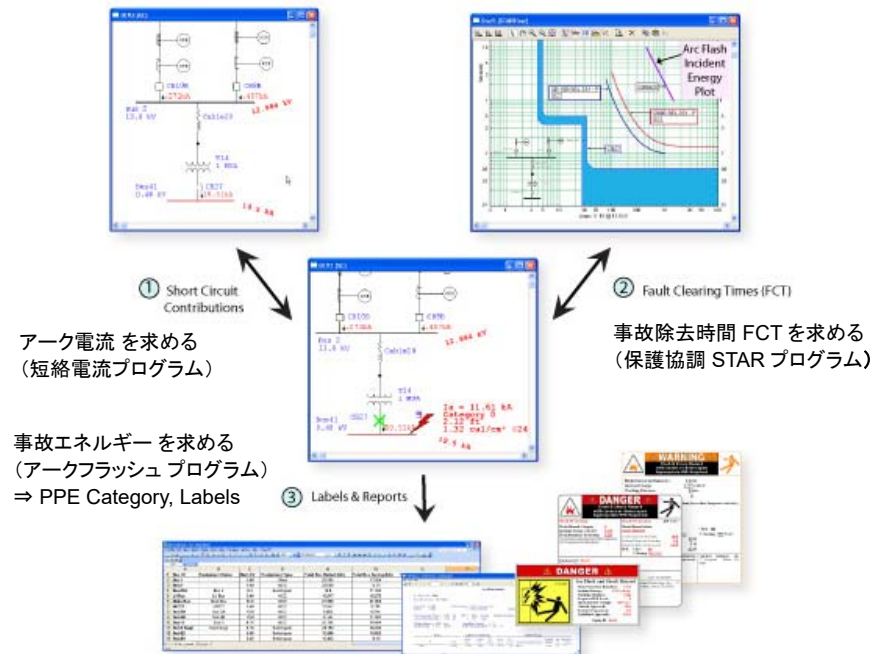


(参考 : Dupont 社の技術資料から抜粋)

アークフラッシュに関する検討項目

- IEEE 1584 および NFPA 70E
 - アーク電流 (Arcing Current)
 - 事故除去時間 (Fault Clearing Time)
 - 作業距離 (Working Distance)
 - 接地方式 (Grounding System)
- 事故エネルギー (Incident Energy)
- ラベルの表示・防護服 (PPE) の着用

アークフラッシュ検討の手順



アークフラッシュ検討の手順

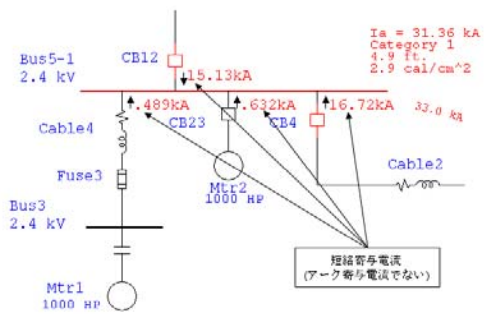
- Step ① アーク電流を求める
- Step ② 事故除去時間を求める
- Step ③ 事故エネルギーを求める
- Step ④ 保護境界を求める
- Step ⑤ 危険度の分類と個人用保護具 (PPE)
- Step ⑥ Arc Flash ラベルを作成する

Step ①

アーク電流 を求める



完全3相短絡電流 (I_{bf} = I[”]k) を求める (ETAP-SC)



合計完全故障電流は、33 kA と等しいです。合計アーク電流は、31.36 kA と等しいです。このケースでの、アーク電流は次のとおりです。

保護装置	アーク電流の配分		
	完全SC (kA)	完全合計の% (kA)	合計アーク電流 (kA)
CB12	15.13	45.85	14.38
CB23	0.623	1.89	0.59
CB4	16.72	50.67	15.89
Cable 4	0.489	1.48	0.46

ETAP User Guide 抜粋



アーク電流 (Arcing Current) は、下記の手順で求めます。

- 完全 3 相短絡電流 (Bolted Fault Current, I_{bf} = I[”]k) を求める。(ETAP SC プログラム)
- IEEE 1584 の計算式より、I_{bf} からアーク電流 (Arcing Current, I_a) を求める。

事故除去時間 (Fault Clearing Time : FCT) を求めるために保護協調図を作成します。(ETAP TCC プログラム)

エネルギーを求める (See Step ③) にあたり、事故除去時間 (FCT) との関連から、I_a が100%の場合と85%の場合の両方の事故エネルギーを計算し、厳しい結果となる I_a の値を適用します。

(ETAP は、入力データのチェックのための電力潮流計算から、短絡電流計算、保護協調図の作成、アークフラッシュ計算までを、共通のデータベース上で、一つのソフトウェアで実行します。)



アーク電流を求める (IEEE 1584)

- 0.208 to 1.0 kV

$$\lg I_a = K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V (\lg I_{bf}) - 0.00304 G (\lg I_{bf}) \quad (1)$$

where

- lg is the log₁₀
- I_a is arcing current (kA)
- K is -0.153 for open configurations and is -0.097 for box configurations
- I_{bf} is bolted fault current for three-phase faults (symmetrical RMS) (kA)
- V is system voltage (kV)
- G is the gap between conductors, (mm) (see Table 4)

- 1.0 to 15.0 kV

$$\lg I_a = 0.00402 + 0.983 \lg I_{bf} \quad (2)$$

- > 15.0 kV

$$I_a = 10^{1.07 I_{bf}} \quad (3)$$



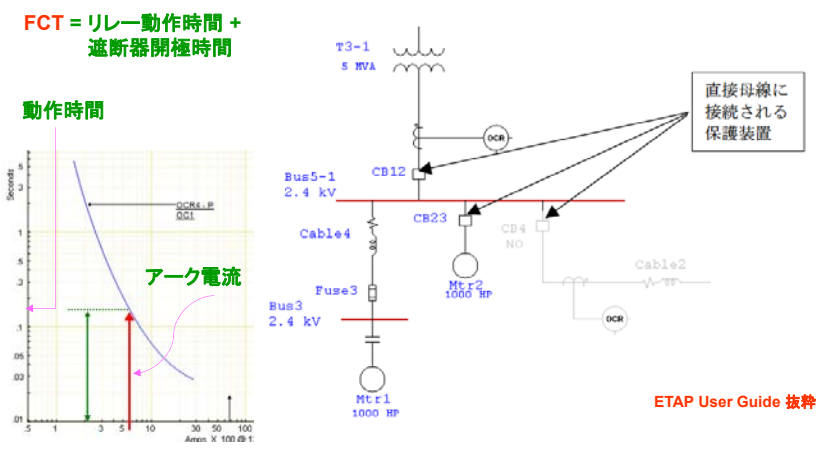
Step ②

事故除去時間を求める



事故除去時間を求める #WDS07du, ?426A

例えば下イメージで Bus 3 での短絡では、Fuse 3 が ETAP になれば CB12 を見ます。両方とも存在していれば、ETAP は短絡を最初にクリアするもの(リレー協調が正しくない場合)を選択します。



事故除去時間を求める (ETAP-Star) <2/3>

(IEEE 1584-2002, Table 1 参考)

表 9 : IEEE 1584-2002: 電力遮断器動作時間^a

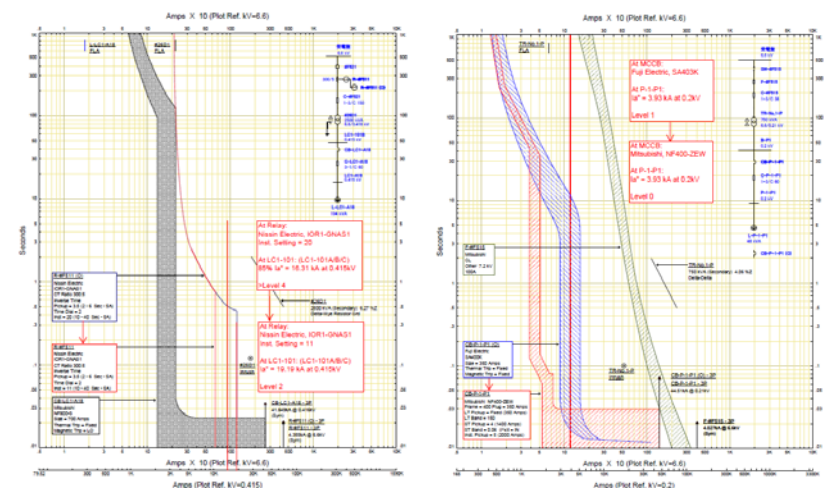
遮断器定格とタイプ	開極時間 60 Hz (サイクル)	開極時間 50 Hz (サイクル)	開極時間 (秒)
配電用 (<1000 V) (トリップ付)	1.5	1.25	0.025
絶縁ケース (<1000 V) (トリップ付またはリレー動作)	3.0	2.5	0.050
電力遮断器 (<1000) (トリップ付またはリレー動作)	3.0	2.5	0.050

^a この表に記載されている値のいずれも、外部トリップ時間を含みません。

FCT = リレー動作時間 + 遮断器開極時間
 遮断器開極時間 ⇒ IEC : Min Time Delay, ANSI : Cycle
 ETAP User Guide 抜粋



事故除去時間を求める (ETAP-Star) <3/3>



Step ③

事故エネルギーを 求める

事故エネルギーを求める (IEEE 1584) <1/4>

■ 経験的手法 (15.0 kV 以下) (1/2)

First find the \log_{10} of the incident energy normalized. This equation is based on data normalized for an arc time of 0.2 seconds and a distance from the possible arc point to the person of 610 mm.

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1.081 \lg I_a + 0.0011 G \quad (4)$$

where

- E_n is incident energy (J/cm^2) normalized for time and distance¹³
- K_1 is -0.792 for open configurations (no enclosure) and
is -0.555 for box configurations (enclosed equipment)
- K_2 is 0 for ungrounded and high-resistance grounded systems and
is -0.113 for grounded systems
- G is the gap between conductors (mm) (see Table 4)

事故エネルギーを求める (IEEE 1584) <2/4>

■ 経験的手法 (15.0 kV 以下) (2/2)

Then:

$$E_n = 10^{\lg E_n} \quad (5)$$

Finally, convert from normalized.¹⁴

$$E = 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (6)$$

where

- E is incident energy (J/cm^2)
- C_f is a calculation factor
1.0 for voltages above 1kV, and
1.5 for voltages at or below 1kV
- E_n is incident energy normalized¹⁵
- t is arcing time (seconds)
- D is distance from the possible arc point to the person (mm)
- x is the distance exponent from Table 4.

事故エネルギーを求める (IEEE 1584) <3/4>

■ Lee 手法 (15.0 kV 超過)

For cases where voltage is over 15 kV, or gap is outside the range of the model, the theoretically derived Lee method can be applied and it is included in the IEEE Std 1584-2002 Incident Energy Calculators.¹⁶ See 7.2 and 9.11.4.

$$E = 2.142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2} \right) \quad (7)$$

where¹⁷

- E is incident energy (J/cm^2)
- V is system voltage (kV)
- t is arcing time (seconds)
- D is distance from possible arc point to person (mm)
- I_{bf} is bolted fault current

For voltages over 15 kV, arc fault current is considered to be equal to the bolted fault current.

事故エネルギーを求める (NFPA 70E) <4/4>

開放 Open Air

$$E_{MA} = 5271D_A^{-1.9593} t_A [0.0016F^2 - 0.0076F + 0.8938]$$

キュービクル Cubic Box

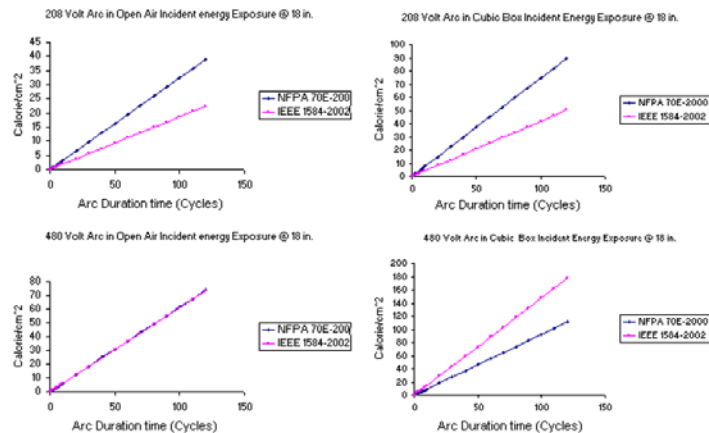
$$E_{MB} = 1038.7D_B^{-1.4738} t_A [0.0093F^2 - 0.3453F + 5.9675]$$

規格の適用範囲

	NFPA 70E	IEEE 1584
電圧の範囲	208 V – 600 V	208 – 15 kV (経験的手法) 15 kV+ (Lee 手法)
電流の範囲	16 kA – 50 kA	0.7 kA to 106 kA
アーク時間の範囲	制限なし	制限なし
対象	開放、キュービクル	開放、キュービクル、 ケーブル母線
作業距離	18 インチ +	18 インチ +
事故エネルギーの単位	Cal/cm ² or J/cm ²	Cal/cm ² or J/cm ²

IEEE 1584 と NFPA 70E 結果の比較

グラフィック上の比較 (Graphical Comparisons)



480V を越える電圧の場合、IEEE 1584 の方が厳しい

ETAP User Guide 抜粋

接地方式による係数 K2

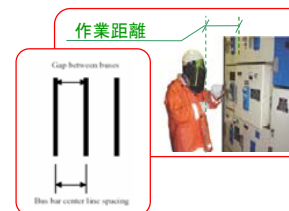
ETAP User Guide 抜粋

系統接地を決定するためのロジック (Logic For Determining the System Grounding)

このオプションが短絡電流スタディケース エディタのアークフラッシュのページから選ばれれば、アークフラッシュ計算によって自動的に接地構成が決定されます。IEEE 1584-2002 により、係数 K2 (事故エネルギーの計算に使用される) は非接地または低・高抵抗接地系統で 0、また接地系統 (直接接地) で -0.113 です。

ギャップと距離 X (エックス) 係数

(IEEE 1584-2002, Table 4)



作業距離 D

D = 18 インチ (45cm)
腕の長さ

Table 4—Factors for equipment and voltage classes^a

System voltage (kV)	Equipment type	Typical gap between conductors (mm)	Distance x factor
0.208-1	Open air	10-40	2.000
	Switchgear	32	1.473
	MCC and panels	25	1.641
	Cable	13	2.000
>1-5	Open air	102	2.000
	Switchgear	13-102	0.973
	Cable	13	2.000
>5-15	Open air	13-153	2.000
	Switchgear	153	0.973
	Cable	13	2.000

^aThe distance x factor is used in 5.3 as an exponent.

Step ④ 保護境界を 求める

保護境界を求める <1/3>

- 経験的手法 (15.0 kV 以下)

$$D_B = \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (8)$$

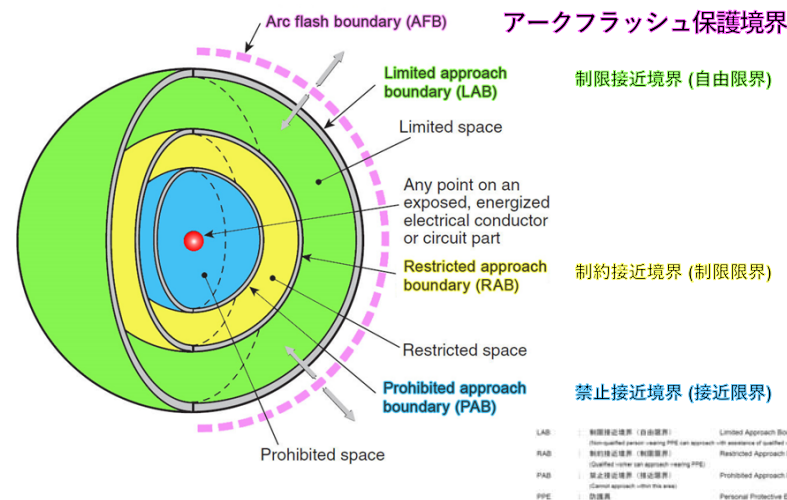
- Lee 手法 (15.0 kV 超過)

$$D_B = \sqrt{2.142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{E_B} \right)} \quad (9)$$

where

- D_B is the distance of the boundary from the arcing point (mm)
- C_f is a calculation factor
1.0 for voltages above 1 kV, and
1.5 for voltages at or below 1 kV,
- E_n is incident energy normalized²⁰
- E_B is incident energy in J/cm² at the boundary distance
- t is time (seconds)
- x is the distance exponent from Table 4. (IEEE 1584)
- I_{bf} is bolted fault current

保護境界を図解する <2/3>



アークフラッシュ保護境界

制限接近境界 (自由限界)

制約接近境界 (制限限界)

禁止接近境界 (接近限界)

LAB	制限接近境界 (自由限界)	Limited Approach Boundary
RAB	制約接近境界 (制限限界)	Restricted Approach Boundary
PAB	禁止接近境界 (接近限界)	Prohibited Approach Boundary
PPE	保護具	Personal Protective Equipment

保護境界に関する規定 <3/3>

アークフラッシュ保護境界 : Arc Flash Boundary (AFB)

アークフラッシュが発生した場合、作業員が2度の火傷(1.2 カロリー/cm²)にさらされる場所。通電した導体が露出している場合、防護服(PPE)着用せずに近づくことのできない境界。

制限接近境界 : Limited Approach Boundary (LAB)

資格のない作業員が通電している導体に近づくこと場合、資格のある作業員の監督の下で適切なPPEを着用していない限り、近づくことのできない境界。この境界内で作業を請けるためのトレーニングを受けることが必要。

制約接近境界 : Restricted Approach Boundary

資格のある作業員が通電している導体に近づく場合、適切なPPEを着用することにより、近づくことのできる境界。この境界内で作業を行うためのトレーニングを受け、作業要領を定めた文書による計画書の作成が必要。

禁止接近境界 : Prohibited Approach Boundary (PAB)

通電している導体に、これ以上近づいてはいけない境界



Step ⑤

危険度の分類 と個人用防護具 (PPE)



危険度の分類

NFPA 70E-2009 (2000 & 2004 もほぼ同様)

NFPA 70E-2012

NFPA 70E 2009年
これらの範囲は、NFPA 70E-2009の表130.7(c)(11)にリストされています。

ユーザー定義の事故エネルギーレベル
次の表で示すようにユーザー定義のレベルは、アークフラッシュモジュールによって解釈されています。

NFPA 70E 2009基準の危険リスク カテゴリ

事故エネルギー照射 cal/cm ²	危険/リスクカテゴリ
0 < Cal/cm ² < 1.2	0
1.2 < Cal/cm ² < 4	1
4 < Cal/cm ² < 8	2
8 < Cal/cm ² < 25	3
25 < Cal/cm ² < 40	4
Cal/cm ² > 40	N/A

ユーザー定義の事故エネルギーレベル

カテゴリ	範囲 (例)	デフォルト
0	0 < Cal/cm ² < C0	2
1	C1 > Cal/cm ² < C0	4
2	C2 > Cal/cm ² < C1	8
3	C3 > Cal/cm ² < C2	25
4	C4 > Cal/cm ² < C3	40
5	C5 > Cal/cm ² < C4	100
6	C6 > Cal/cm ² < C5	120
7	C7 > Cal/cm ² < C6	0
8	C8 > Cal/cm ² < C7	0
9	C9 > Cal/cm ² < C8	0

レベルの範囲は、常に低い値から高い値の間です。たとえば、レベル 4 の値はレベル 3 の値よりも低いか高くなることはできないことを意味します。これは全てのレベルに当てはまります。

ETAP User Guide 抜粋

カテゴリの記号と事故エネルギー限界の関連をユーザーが既定できる。

(NFPA 70E および IEEE 1584 は、これまで数年おきに改定されています。いつも最新の規格をご参照下さい。etap はいつも最新の規格に対応していますので、etap の User Guide を参照するのも有効です。)



個人用保護具 (PPE) に関する規定

ETAP User Guide 抜粋

NFPA 70E-2009 (2000 & 2004 もほぼ同様) NFPA 70E 2009年 (付属表 互補表、トウ製カテゴリの耐火 (FR) 服システム)	カテゴリ 0	非溶融または未処理の自然繊維素材の長袖シャツ、長ズボン、保護めがね、耳保護および手足袋
	カテゴリ 1	未処理の綿素材 Tシャツの上に防火長袖シャツ (最低アーク定格が 4)、防火ズボン (最低アーク定格が 8) または防火カバーオール (最低アーク定格が 8) を着用
	カテゴリ 2	未処理の綿素材 Tシャツの上に防火長袖シャツ (最低アーク定格が 4)、防火ズボン (最低アーク定格が 8) または防火カバーオール (最低アーク定格が 8) を着用
	カテゴリ 3	防火シャツとズボン、および/または防火カバーオール、および/またはアークフラッシュコートとズボン (衣類システム最小アーク定格が 4) から成る統合衣類システム
NFPA 70E-2012	カテゴリ A	非溶融または未処理の自然繊維素材の長袖と長ズボン
	カテゴリ B	未処理の綿素材 Tシャツの上に防火長袖シャツ (最低アーク定格が 4)、防火ズボン (最低アーク定格が 8) を着用
	カテゴリ C	未処理の綿素材 Tシャツの上に防火長袖シャツ (最低アーク定格が 4)、防火ズボン (最低アーク定格が 8) を着用
	カテゴリ D	多層防火フラッシュジャケット、防火オーバーオール (最低アーク定格が 4) または防火長袖シャツの上に重ね着した胸当て付き防火オーバーオール、未処理天然繊維素材の長袖シャツとズボンの上に重ね着した防火ズボン (最低アーク定格が 4)、未処理天然繊維素材のシャツの上に重ね着したズボン
ユーザー定義 (自分独自の事故エネルギー限界と PPE 説明を定義できます。しかし NFPA は 40 cal/cm ² までの PPE 説明を提供するのみです。) カテゴリの記号と事故エネルギーの限界およびPPE説明関連をユーザーが既定できる。	カテゴリ E	多層防火フラッシュジャケット、防火オーバーオール (最低アーク定格が 4) または防火長袖シャツの上に重ね着した胸当て付き防火オーバーオール、未処理天然繊維素材の長袖シャツとズボンの上に重ね着した防火ズボン (最低アーク定格が 4)、未処理天然繊維素材のシャツの上に重ね着したズボン
	カテゴリ F	NFPA 70E に基づくものではありません
	カテゴリ G	NFPA 70E に基づくものではありません
	カテゴリ H	NFPA 70E に基づくものではありません
	カテゴリ I	NFPA 70E に基づくものではありません
	カテゴリ J	NFPA 70E に基づくものではありません

(NFPA 70E および IEEE 1584 は、これまで数年おきに改定されています。いつも最新の規格をご参照下さい。etap はいつも最新の規格に対応していますので、etap の User Guide を参照するのも有効です。)



アークフラッシュ 個人用保護具 (PPE)



放出される事故エネルギーを求め



適切な個人用防護具 (PPE) の着用 (Personal Protective Equipment)



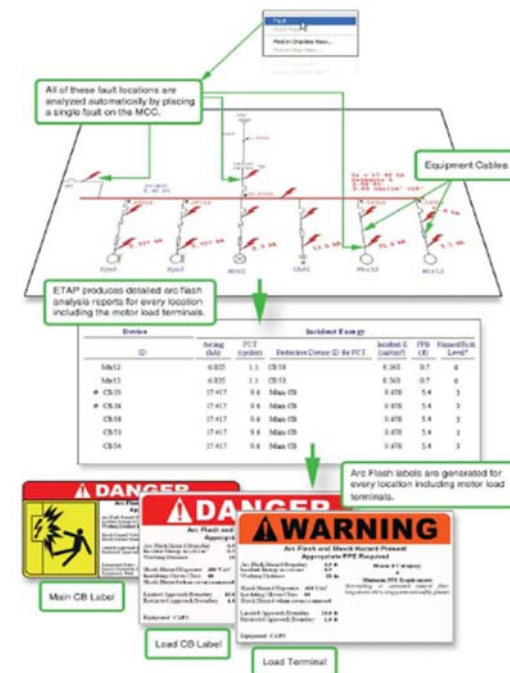
機器に適切なラベルの貼付



Step ⑥

Arc Flash ラベルを作成する

Arc Flash の計算とラベルの作成



Arc Flash ラベルの例

アークフラッシュ結果

アークフラッシュと感電の危険

フラッシュ保護境界	4.0 ft
事故エネルギー (cal/cm²)	5.1
作業距離	18 in
必要なPPEレベル	2
感電危険電圧	480 V
限界接近	3.5 ft
制約接近	1.0 ft
禁止接近	0.1 ft

感電危険境界

機器 母線1

アークフラッシュと感電の危険

フラッシュ保護境界	1.7 ft
事故エネルギー (cal/cm²)	1.5
作業距離	18 in
必要なPPEレベル	1
感電危険電圧	480 V
限界接近	3.5 ft
制約接近	1.0 ft
禁止接近	0.1 ft

機器 CB15

Arc Flash ラベルの印刷と貼付け

