

高電圧EVヒューズの実用化に 向けた実証的研究

埼玉大学 大学院 理工学研究科
准教授 山納 康

2022年3月11日

研究背景

地球温暖化等の環境問題
蓄電池の低コスト化



電気自動車の需要の拡大

電気自動車の課題^[1]

- 航続距離の短さ
- 充電時間の長さ



解決策

二次電池の高電圧直流化

保護装置であるヒューズの
高電圧化が必要



競技用電気自動車
(1000Vクラスも検討)

電気自動車用ヒューズ

…… 事故時には短絡電流を遮断できるとともに
過電流に対しても規定の時間で溶断することが必要

研究背景 (EV・HEVの高電圧化)



フォーミュラE用
競技用電気自動車
1000Vクラス

2000年前半



電池種類: ニッケル水素電池
容量: 5.75Ah
総電力量: 0.58kWh
電池電圧: 100.8V

2000年代後半



電池種類: ニッケル水素電池
容量: 6.5Ah
総電力量: 1.3kWh
電池電圧: 201.6V

2010年代



電池種類: リチウムイオン電池
容量: 66.7Ah
総電力量: 24kWh
電池電圧: 360V

従来の自動車
電池電圧: 12V



従来技術とその問題点

既に実用化されているものは、DC400V～500VクラスのEV用ヒューズがあるが、

- ◎ 高電圧化に起因する遮断性能の悪化が発生
- ◎ 様々な事故電流への対応

直流(DC)で高電圧の遮断が困難になりつつある。

自動車用ヒューズに求められる性能

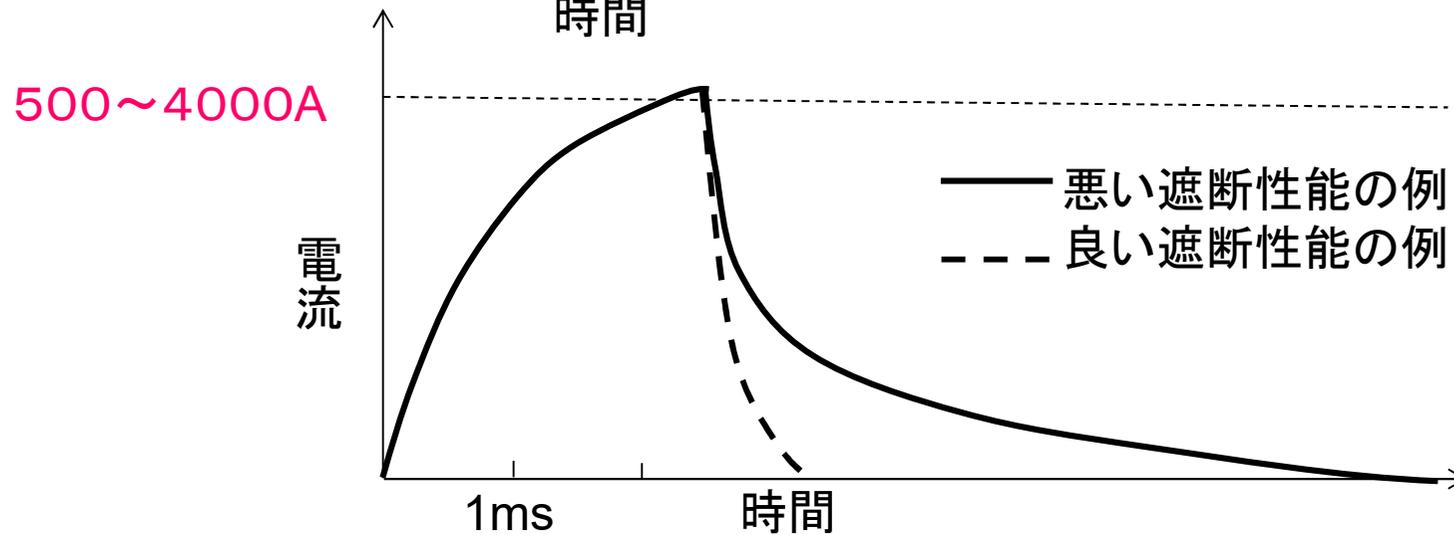
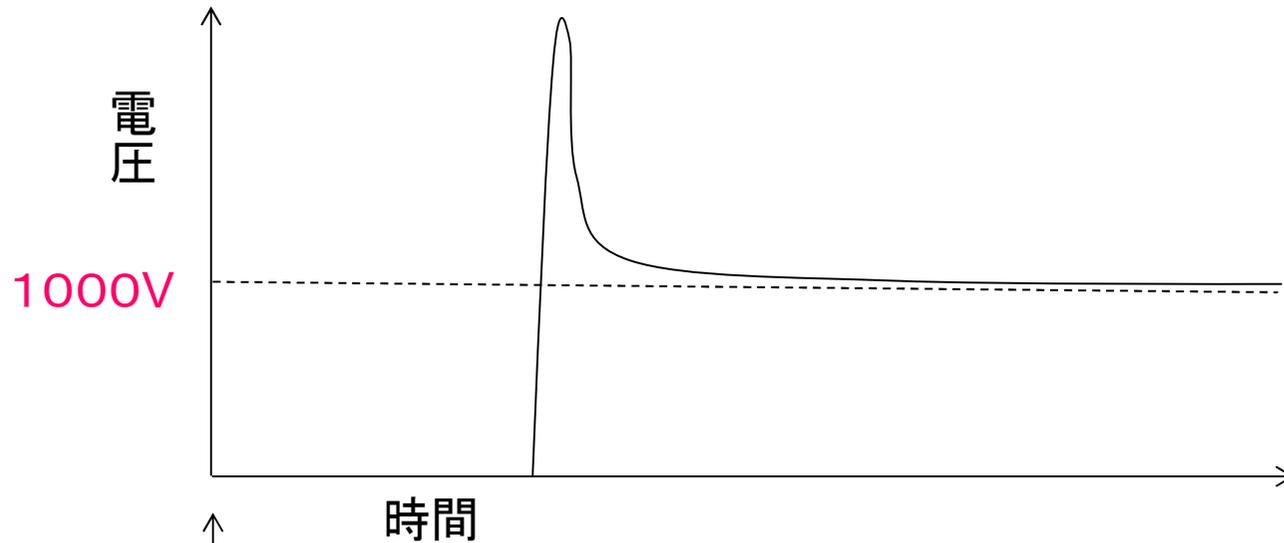
規格：自動車部品一ねじ締め形高電圧ヒューズ（JASO D 622）
で性能を規定

自動車の直流高電圧システム（60V～450V）の駆動用・補機回路用として使用する定格電流400A以下，定格電圧450V，遮断容量2000Aのねじ締め形ヒューズ

- 遮断容量性能
 - 溶断時間性能
 - 電圧降下
 - トランジェント電流断続耐久性
 - 耐環境性（機械的負荷・気候負荷・化学負荷）
- 端子強度
 - 温度上昇
 - 耐熱衝撃

遮断特性

- 500~4000Aの電流（立上り時定数 $2.0 \pm 0.5\text{ms}$ ）を、回復電圧（直流1000V）で遮断できること。

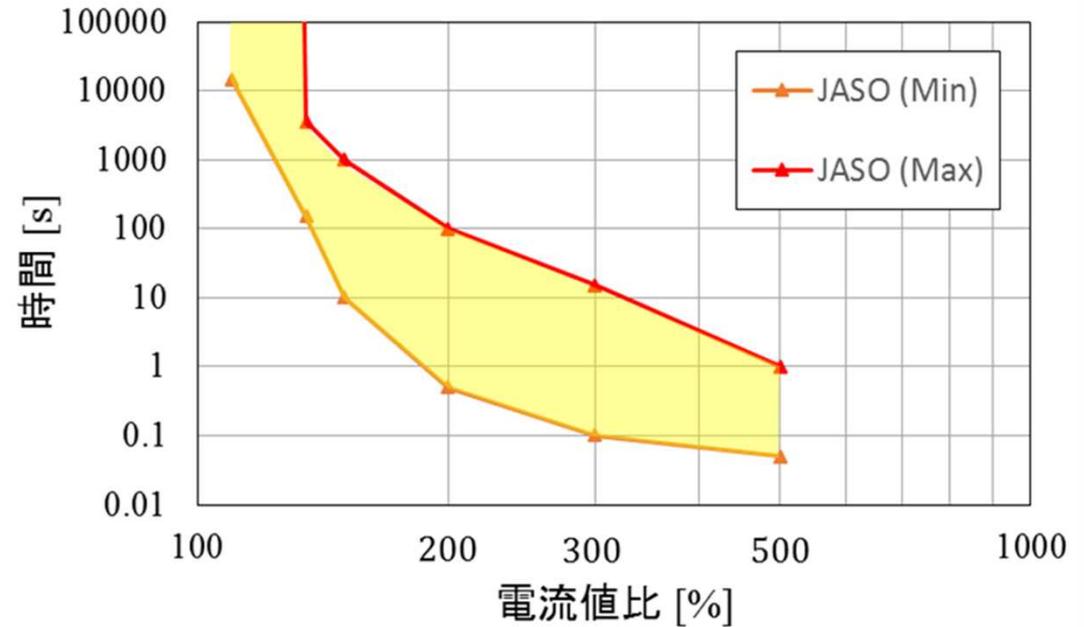


遮断時の電圧・電流の波形例

溶断時間試験～試験方法～

✓ 定格電流と等しい電流は流し続けることができること。

✓ 定格電流を越えた電流が流れたときには**決められた時間の範囲内**で電流を遮断することができること。



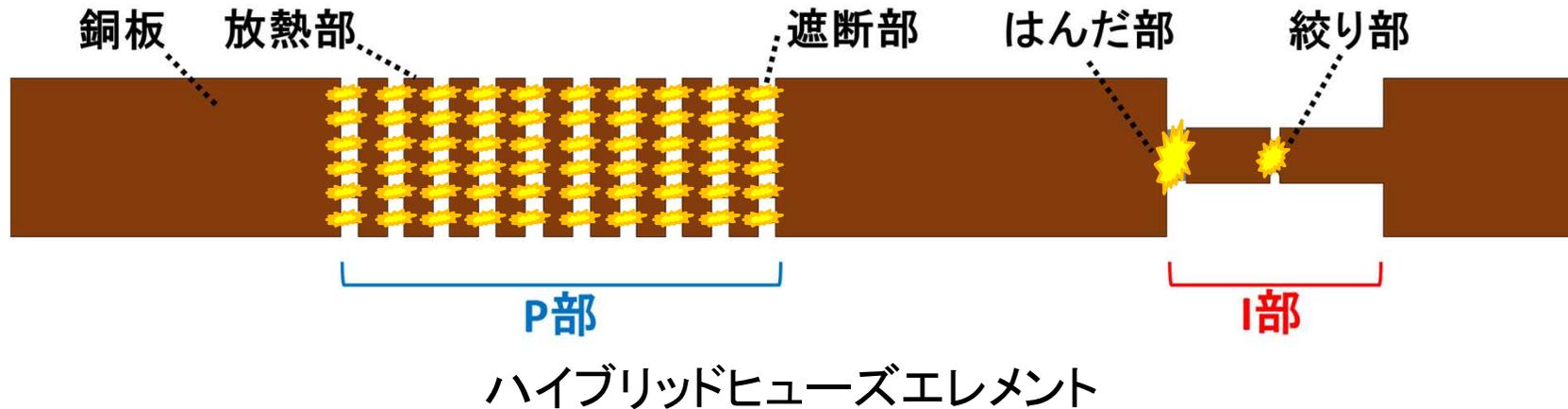
本ヒューズが満たすべき溶断時間特性の範囲

JASO規格により規定される試験電流及び溶断時間^[10]

試験電流 [A]	溶断時間 [s]					
	I_R : 60 A未満 H1, H2, H3, H4, J3		I_R : 60 A以上			
			J1, J5		J2, J4	
	最小	最大	最小	最大	最小	最大
定格電流の110 %	14400	∞※	14400	∞※	14400	∞
定格電流の135 %	150	3600	-	-	150	3600
定格電流の150 %	10	1000	5	3600	20	1500
定格電流の200 %	0.5	100	1	300	1	300
定格電流の300 %	0.1	15	0.2	30	0.2	30
定格電流の500 %	0.05	1.0	0.05	1.0	0.05	1.0

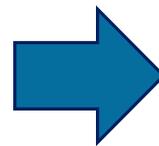
[10] JASO規格[D]電装 No.622-11 :「自動車部品-ねじ締め形高電圧ヒューズ」

ハイブリッドヒューズ(二要素ヒューズ)



直流遮断特性

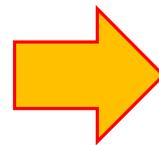
短絡電流
(数千 A)



電流密度の高い
P部が溶断

溶断時間特性

過電流
(数十 A ~ 数百 A)



P部は放熱が良いため
I部が溶断

技術シース

高電圧化に対する直流遮断特性の向上

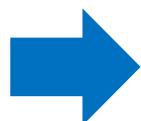


傾斜抵抗・放熱分布のヒューズ

ヒューズエレメントの熱計算

P部の放熱部の長さ

P部の幅と長さの最適化



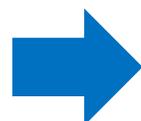
直流遮断特性の向上

高電圧対応ハイブリッドヒューズエレメント

① P部の放熱部の長さ

② P部のくびれ部の幅

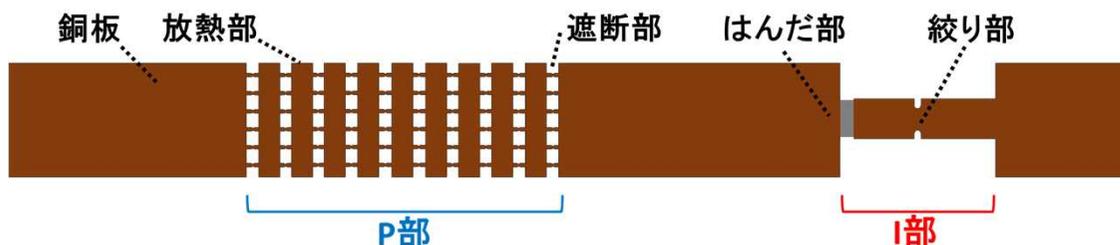
③ P部の直列遮断点数



直流遮断特性の向上

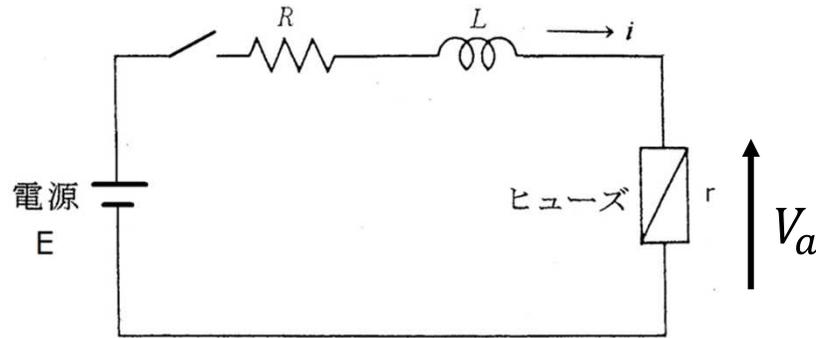


高電圧化への対応



ハイブリッドヒューズエレメントの例

直流用ヒューズの動作原理



ヒューズの等価回路

$$E = i(R + r) + L di/dt$$

ヒューズ発弧後は $r \gg R$

$$di/dt = (E - V_a)/L \quad V_a: \text{アーク電圧}$$

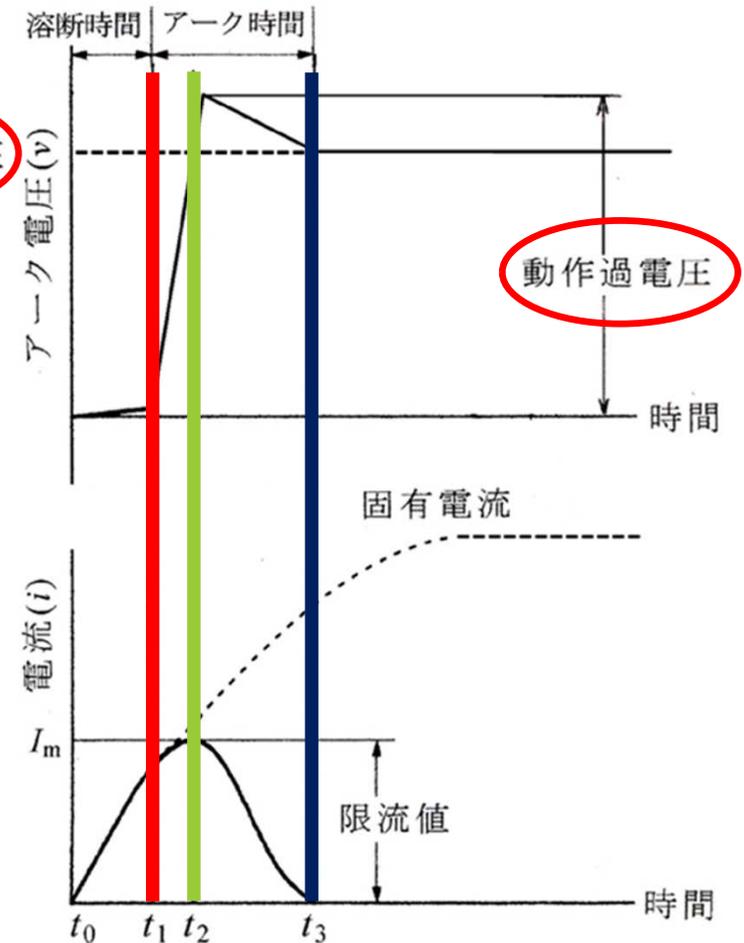
t_1 : ヒューズが溶断し、アークが発生

↓ アーク電圧が上昇

t_2 : $di/dt = 0$ となり、電流の増加が停止

↓ 電流が限流される

t_3 : アークが消滅し、電流遮断完了



限流ヒューズの遮断波形概略図

電源電圧を超える
動作過電圧が必要

新技術の特徴・従来技術との比較

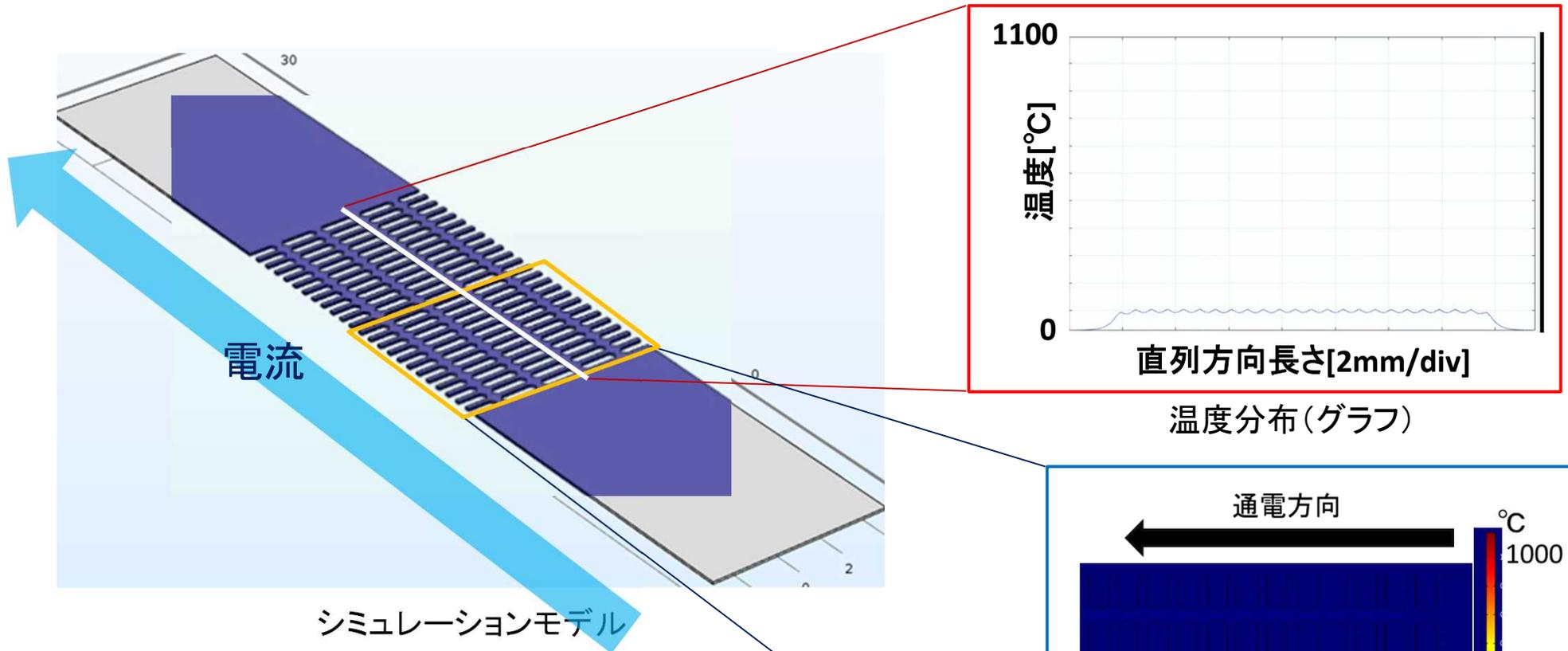
- 従来技術の問題点であった、直流・高電圧での遮断性能を改良することに成功した。
- ヒューズエレメントを電流－伝熱連成計算を基に設計し、固有電流に合わせてP部を調整して、同時発弧を起させ、高い動作過電圧を得ることに成功した。

電流－伝熱の連成計算に基づくエレメントの設計

【通知コメントに基づく開発計画の見直し】

ヒューズエレメントの設計時に、電流－伝熱連成シミュレーションを適用
事前に遮断試験の大電流が通電されたときの温度分布を計算
ヒューズエレメントの形状に関する設計パラメータを最適化

モデルに電流を流した際の発熱・伝熱を計算し、温度分布をシミュレートする



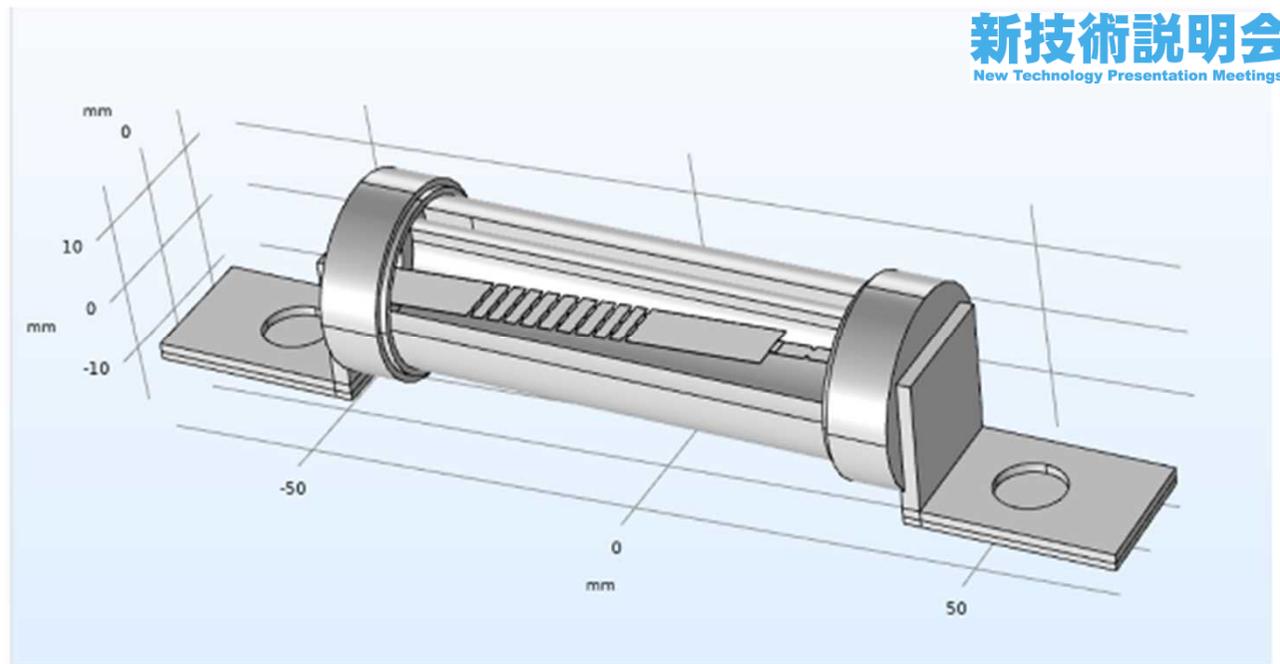
温度分布が均一になるエレメントを作製する

シミュレーションのモデル図

• ヒューズリンク

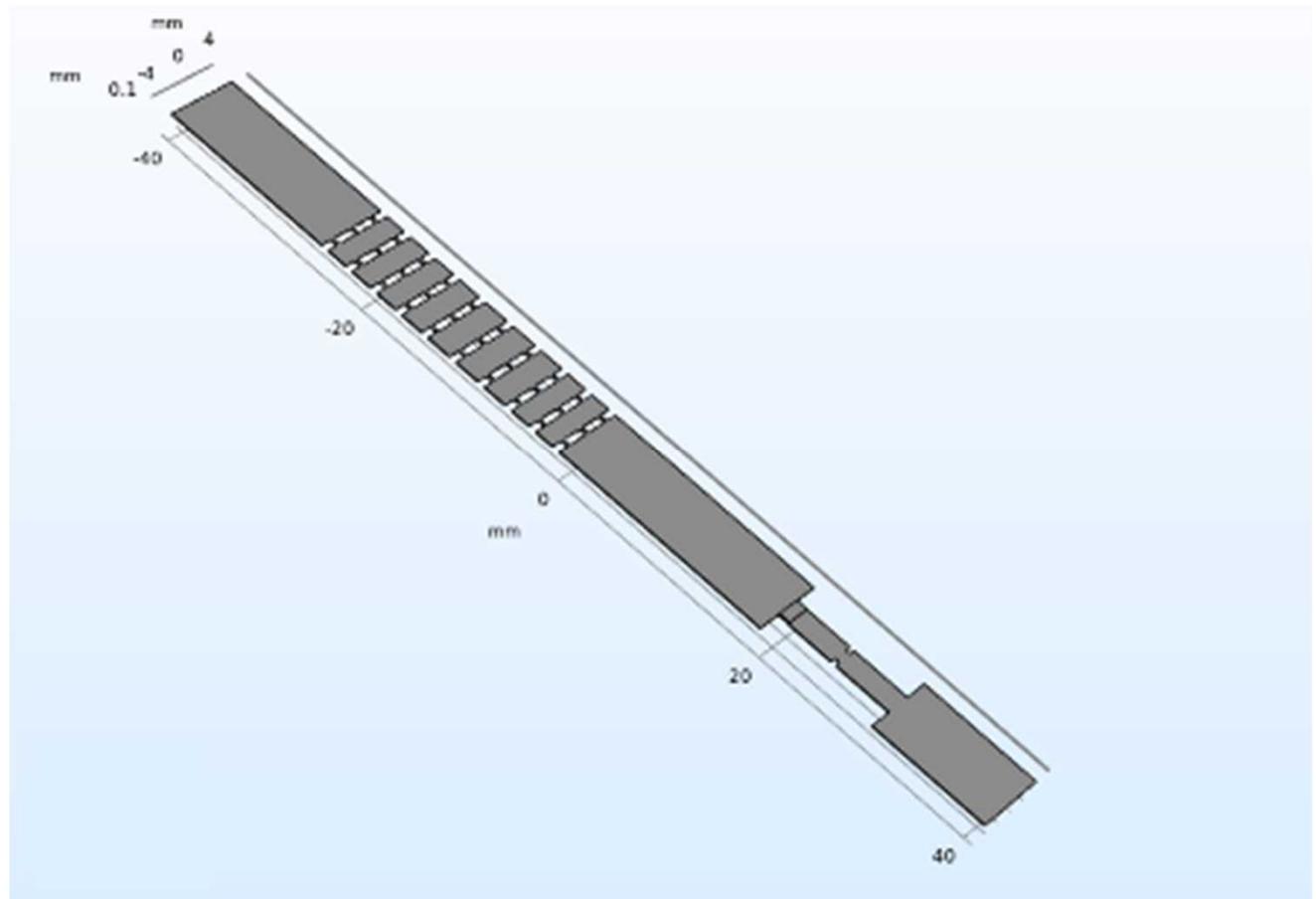
1. ヒューズエレメント
2. 消弧砂
3. 内キャップ
4. 外キャップ
5. 端子部

をそれぞれ模擬

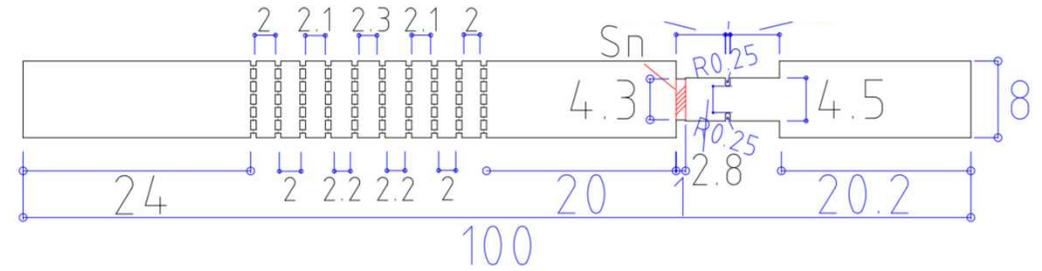
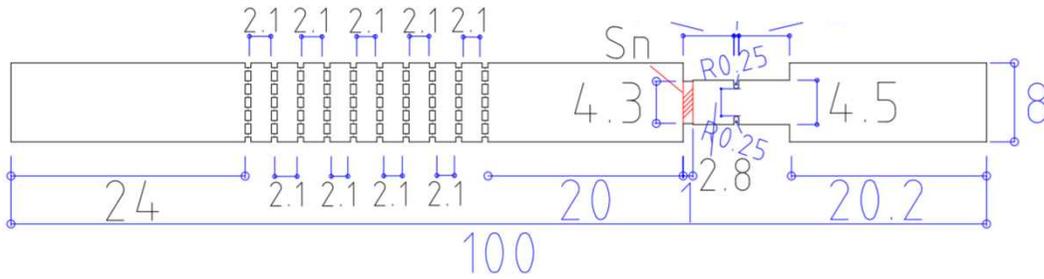


• ヒューズエレメント

P部の遮断部の細部まで模擬

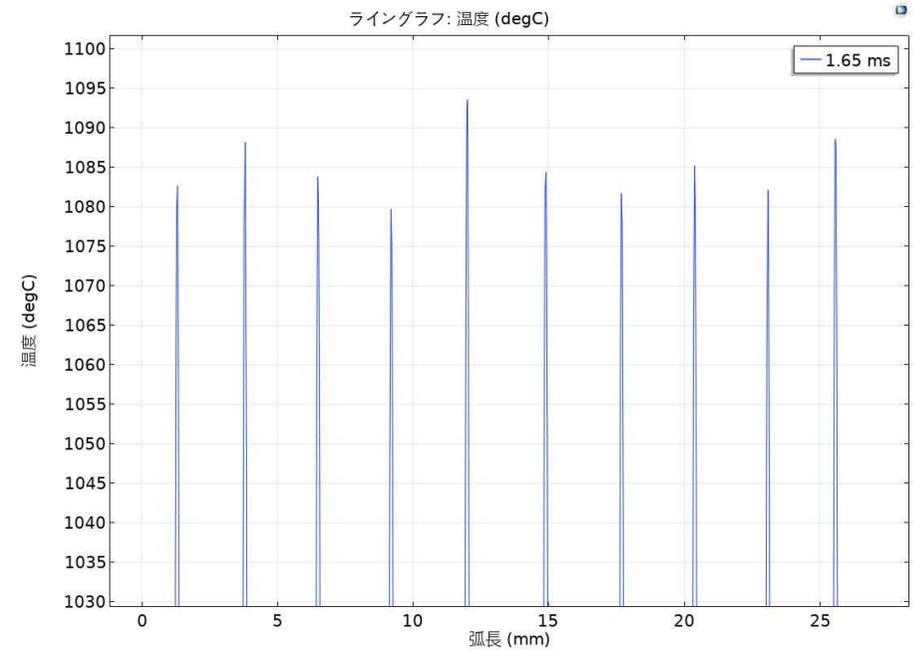
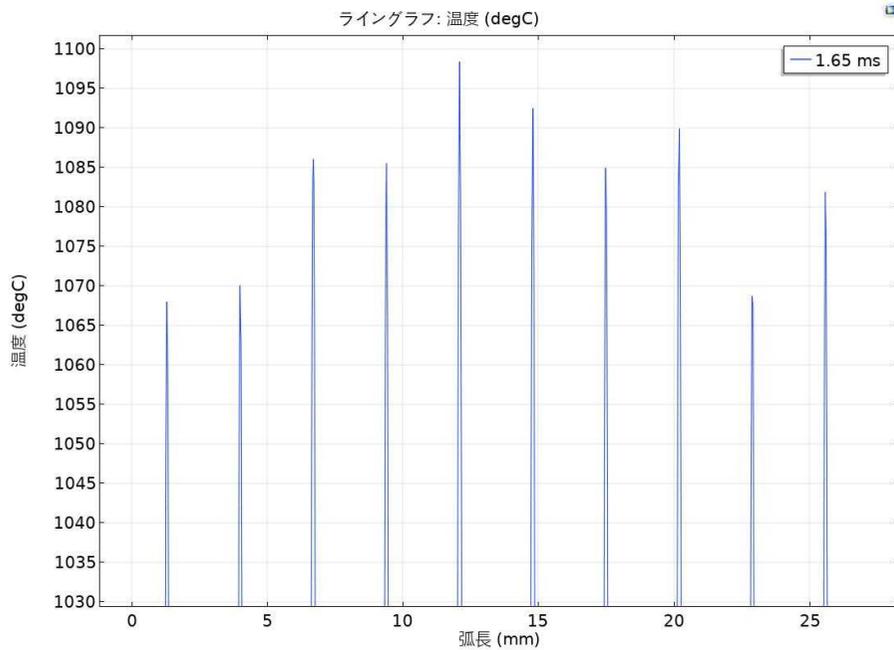


<電流-伝熱の連成計算の適用①>



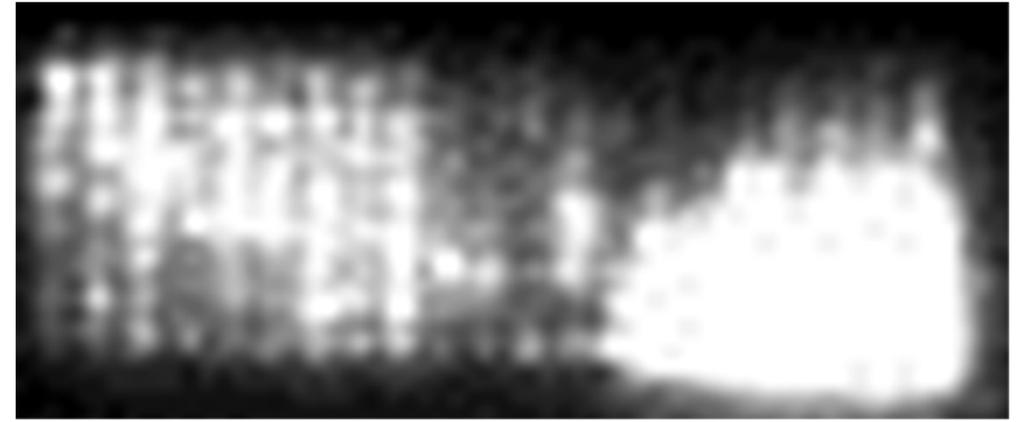
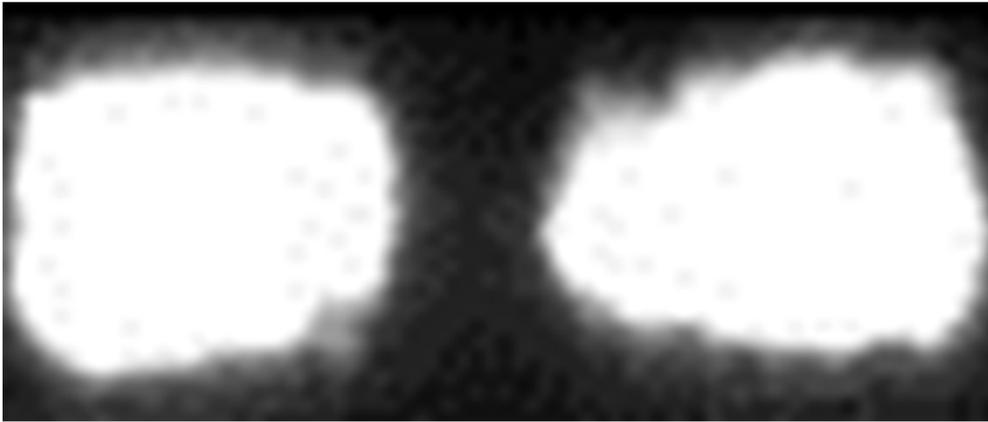
HCEX5-0

HCEX5-1



時定数 2.0ms 2000A 通電後溶融直前のP部温度

ヒューズ内部のアーク放電の様子



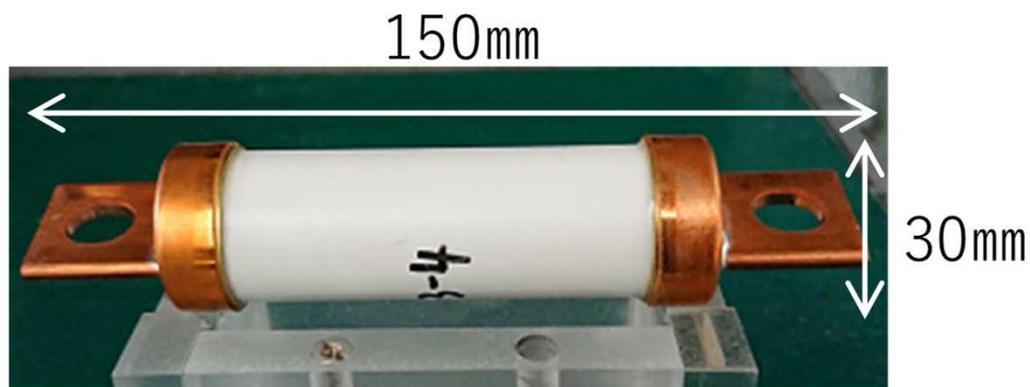
(a) 部分的なアーク発弧の様子

(b) 適切な傾斜抵抗値分布の場合のアーク発弧の様子

遮断時のアーク放電の様子

電流は左から右に流れている。ヒューズエレメント全体にアーク放電が発生しているほど動作過電圧が高く、電流遮断が良くなる。この場合、左図は中心が発弧していないが、右図は全体に発弧している。

ヒューズリンクの一例と 遮断試験の様子



EV用ヒューズリンクの例

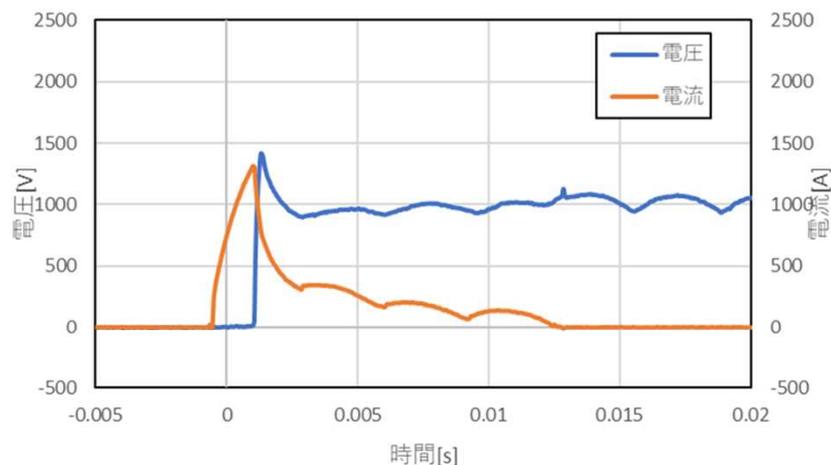


ヒューズの配線と配置および防爆ボックス

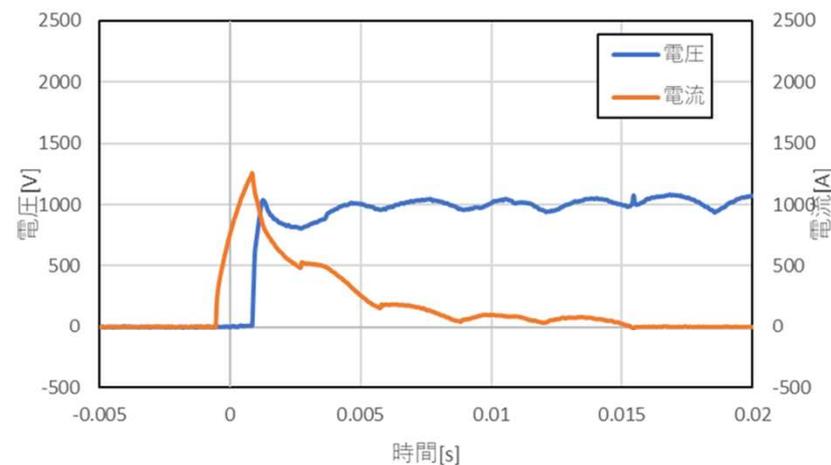


学外遮断試験場の遮断試験の様子

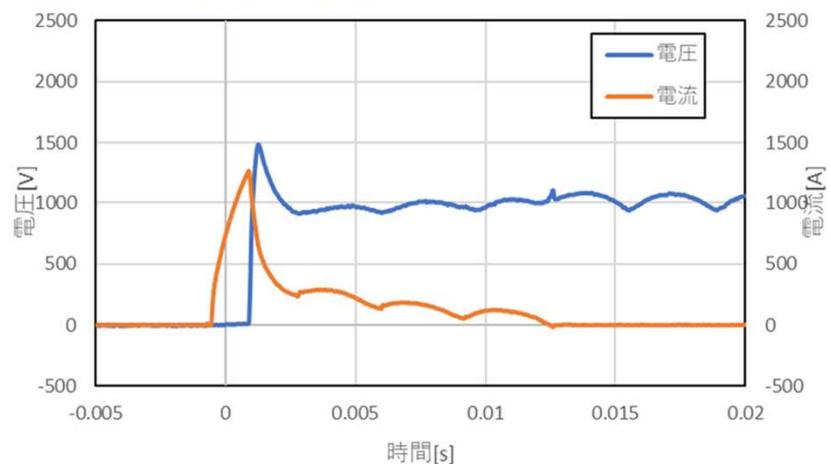
DC1000V, 固有電流2000Aでの遮断試験結果



(a) HCEX4 型ヒューズエレメント



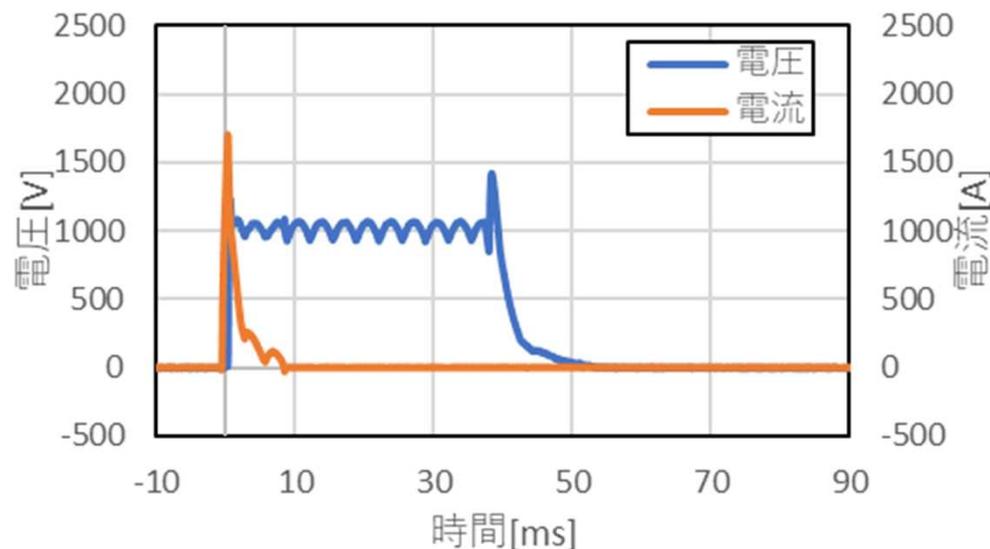
(b) HCEX5 型ヒューズエレメント



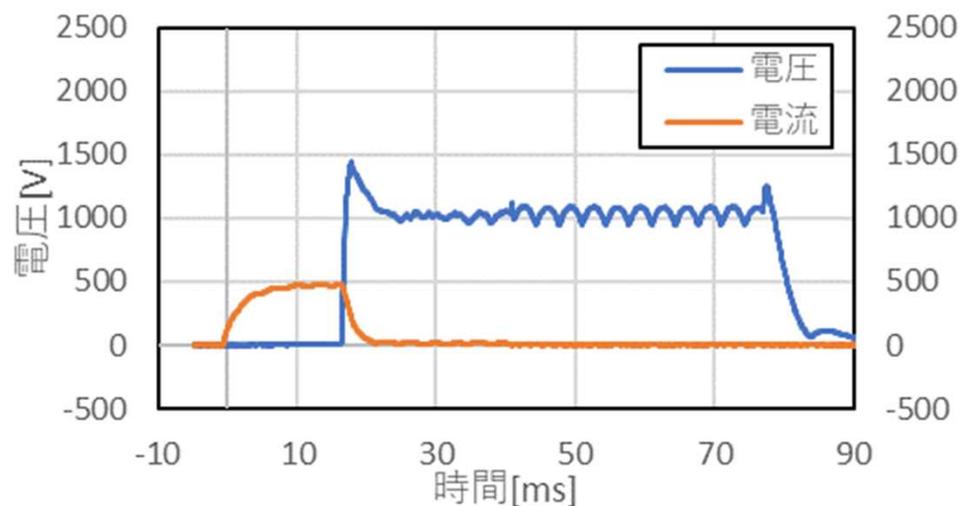
(c) HCEX6 型ヒューズエレメント

実規模の遮断容量を持つ遮断設備(学外設備)における電圧DC 1000V,
遮断電流2000A遮断試験において, 良好に遮断できることの確認

種々の固有電流(500A~4000A)での遮断試験結果



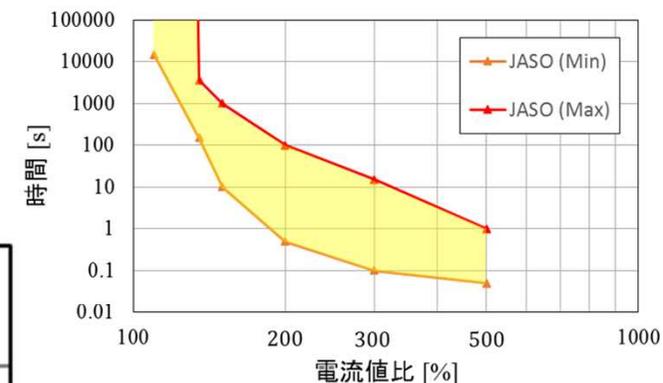
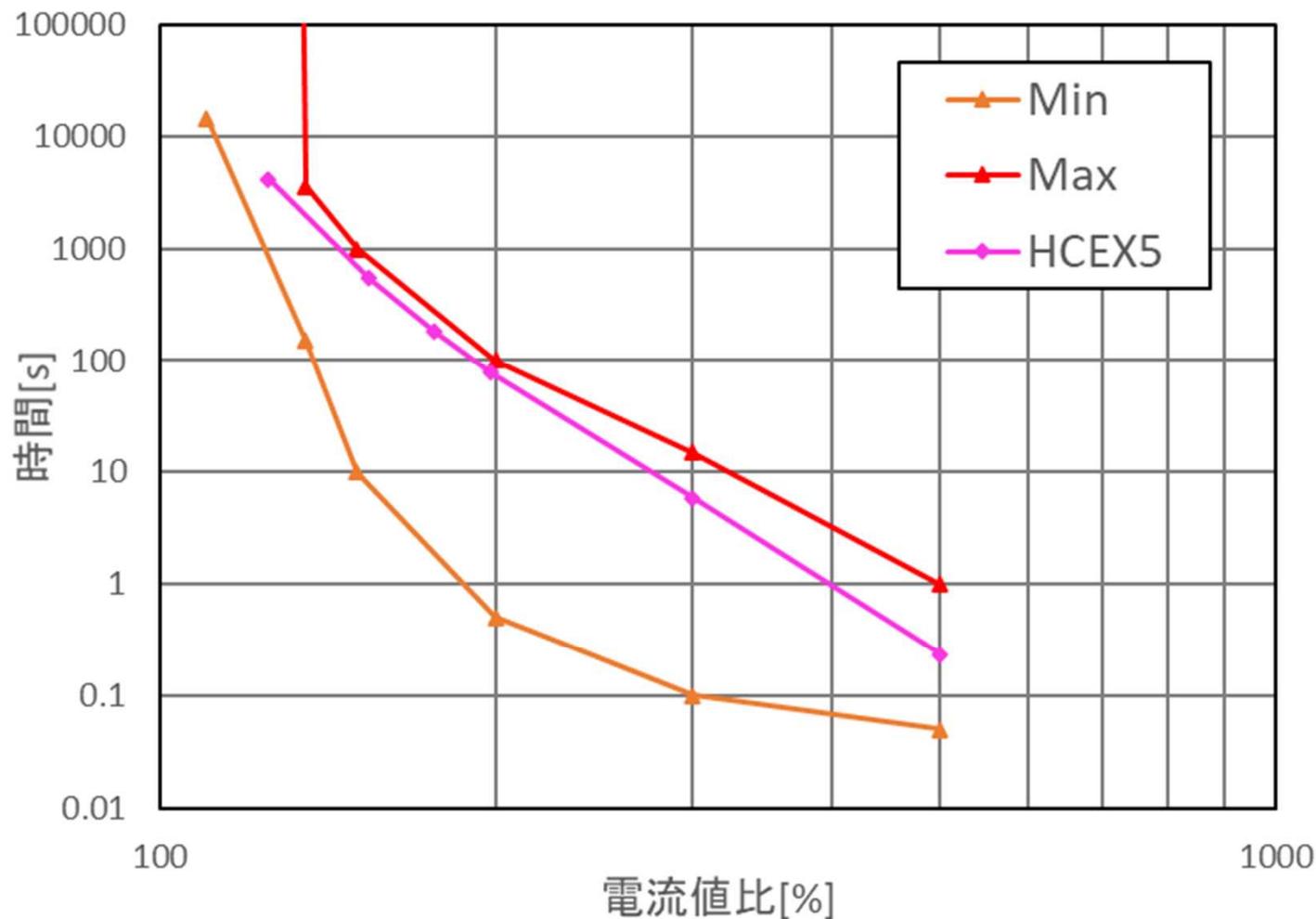
1000V
4000A
(HCEX5)



1000V
500A
(HCEX8)

実規模の遮断容量を持つ遮断設備(学外設備)における電圧DC 1000V,
遮断電流500A~4000A遮断試験において, 良好に遮断できることの確認

溶断時間特性



本ヒューズが満たすべき
溶断時間特性の範囲
(日本自動車協会規格より)

溶断時間試験の結果, 日本自動車規格 (JASO規格) を満たす溶断時間内で溶断できることを確認済み。

想定される用途 ①

• 直流利用の電化機器

適用事例： エレクトロモビリティ

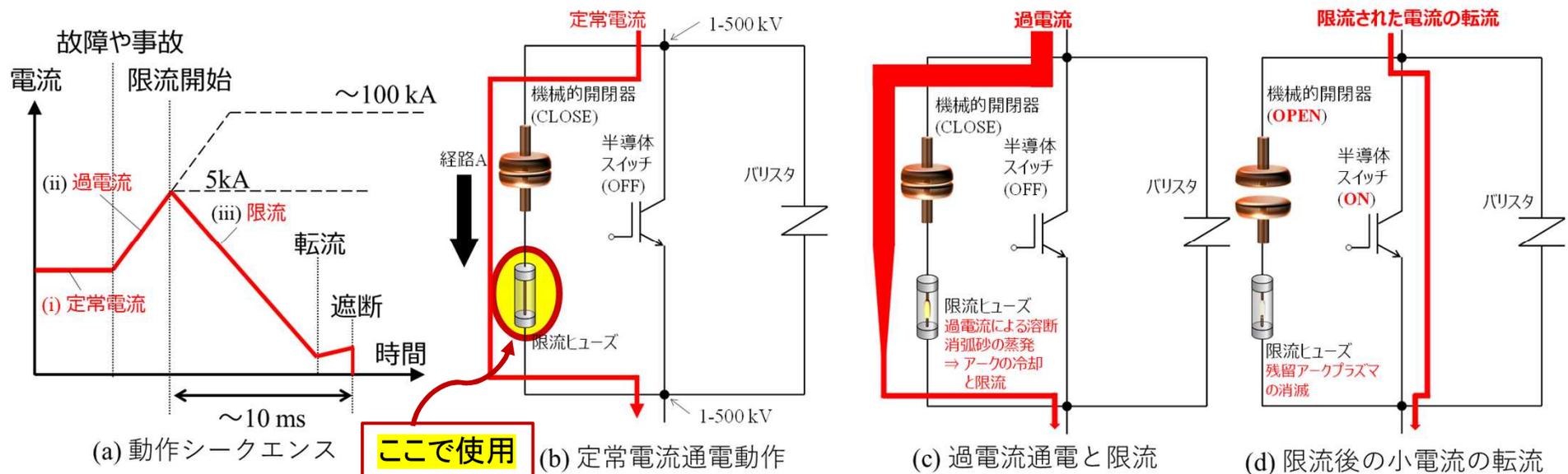
(ハイブリッド車、電気自動車、電動航空機、電動船舶、電気鉄道)

データセンターの送配電設備

電力系統の送配電システム

新規活用事例： 限流機能付遮断器のヒューズとして利用

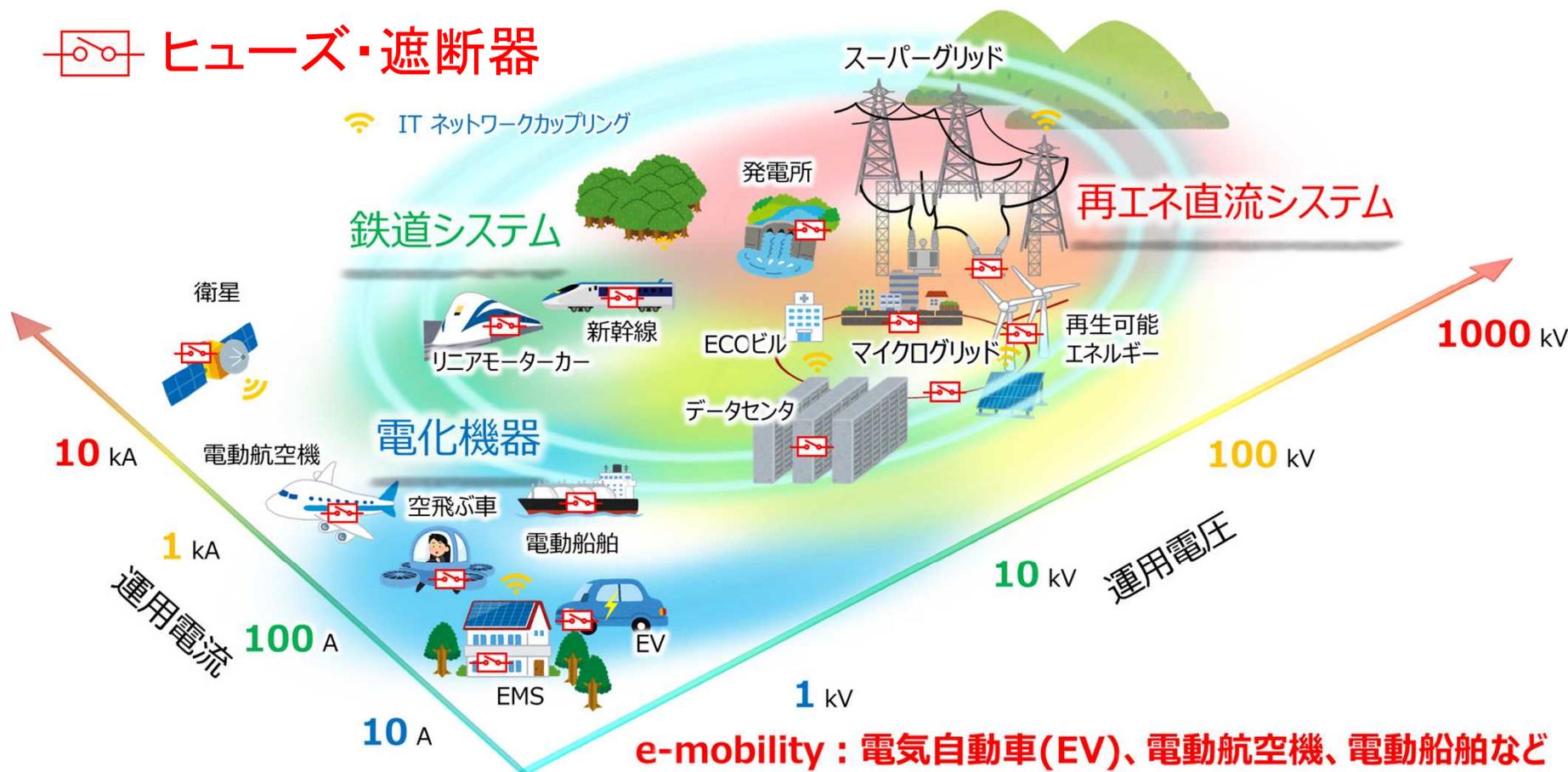
(2021年度NEDO未踏チャレンジ2050)



想定される用途 ②

- 過電流からの保護が必要となる電力システムや電化機器

ヒューズ・遮断器



実用化に向けた課題

- 現在、高電圧直流電圧について日本自動車規格相当の試験（遮断試験・溶断時間試験）を満たすところまで開発済み。今後、環境負荷試験を進める。
- 定格電流の増加・大容量化について実験データを取得していく。
- 実用化に向けて、ヒューズ筒の碍管をセラミックスからFRPに対応した技術を確立する必要もあり。

企業への期待

- 大容量・定格電流の増加は、ヒューズエレメントの並列化の技術により克服できると考えている。
- 自動車用の遮断試験設備を持つ、企業との共同研究を希望。
- また、直流電化製品を開発中の企業には、本技術の導入が有効と思われる。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : ハイブリッドサブストレート
ヒューズエレメント
- 出願番号 : 特許 第6435105
- 出願人 : 埼玉大学, 宇都宮電機製作所,
ネモト・センサエンジニアリング, 双信電機
- 発明者 : 山納康, 勝又信顕, 堀内大輔,
石川雄三, 安藤朗, 伊藤康行

お問い合わせ先

国立大学法人 埼玉大学

オープンイノベーションセンター

産学官連携推進部門

TEL 048-858-3849

e-mail coic-sangaku@ml.saitama-u.ac.jp