

並列回路で組まれた非線形抵抗器「バリスタ」による 加速器用超伝導磁石保護システムの研究

APPLICATION OF THE PARALLEL-SCHEME “VARISTOR” TO THE SUPERCONDUCTING ACCELERATOR MAGNET AS THE ENERGY EXTRACTION SYSTEM

西将汰^{#, A)}, 鈴木研人^{B)}, 中本建志^{B)}, 菅野未知央^{B)}, 荻津透^{B)}, 山崎祐司^{A)}

Shota Nishi^{#, A)}, Kento Suzuki^{B)}, Tatsushi Nakamoto^{B)}, Michinaka Sugano^{B)}, Toru Ogitsu^{B)}, Yuzi Yamazaki^{A)}

^{A)} Kobe University

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

A parallel-scheme nonlinear-resistances, varistors, is adopted as quench protection device of the superconducting magnet, and is installed in a test bench of Cryogenic Science Center in High Energy Accelerator Research Organization (KEK). The system is designed for extracting magnet's stored energy up to 5 MJ, while suppressing the maximum terminal voltage below 575 V even at a quench current of 15 kA. Performance of the parallel-scheme varistors are investigated through energization tests of 3 superconducting dipole magnets, D1, which is being fabricated for the high-luminosity upgrade of the Large Hadron Collider (HL-LHC). In order to evaluate stability of the system, a normalized current is introduced by taking a ratio of the branch current in a varistors' circuit to the quench current. A current-imbalance level among the varistors is then estimated by calculating variance of the 5 normalized currents for each quench event. The result shows that the variance is kept below 4.1×10^{-4} through all the quench events, and the parallel-scheme varistors exhibit a stable performance. We further investigate an algorithm for detecting a current imbalance in the varistors, which is planned to be implemented for future energization tests of the HL-LHC D1 magnet.

1. はじめに

Large Hadron Collider (LHC) は欧州原子核機構 (CERN) によってスイスのジュネーブの地下に設置された 7 + 7 TeV (設計値) の世界最高エネルギー陽子陽子衝突型加速器である。LHC ではその統計量を 10 倍以上に増やすため、High Luminosity LHC upgrade (HL-LHC) 計画が現在進行中であり、ピーク luminositiy としては $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、積分 luminositiy としては 3000 fb^{-1} の達成を目指している[1]。このアップグレードでは Low-beta 衝突点における実験サイト (ATLAS と CMS) のための最終収束磁石群を既存の LHC から大幅変更し、これに含まれるビーム分離双極磁石 (通称 D1) もこれまでの常伝導磁石から超伝導磁石へと一新する。

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は CERN との国際研究協力のもと D1 の製造を担当しており、7 m 長実証機 1 台と実機 6 台の現物貢献を行う。D1 のパラメータを Table 1 に、磁石断面図を Fig. 1 に示す。D1 は、150 mm の大口径であり、定格電流は 12.11 kA でその時の積分磁場は 35 Tm、蓄積エネルギーは 2.1 MJ に達する NbTi 超伝導電磁石である。

KEK 超伝導低温工学センターでは 9 m 長のクライオスタットを有し、超流動ヘリウム温度 1.9 K 下にて最大 15 kA 通電による超伝導電磁石励磁試験が可能である。この試験設備では通電電流値を上げながら常伝導転移 (クエンチ) を繰り返す「クエンチトレーニング」を行い、定格電流を目指すのだが、クエンチ後のジュール熱による局所的な温度上昇による焼損を防ぐために、速やかな

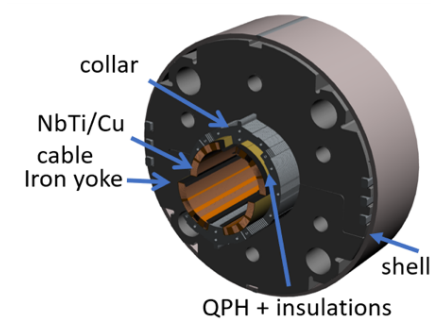


Figure 1: Cross section of D1 magnet.



Figure 2: Picture of the varistor.

電流遮断が重要となる。また、超伝導電磁石に蓄えられた磁気エネルギーを回収抵抗等で外部へ最大限取り出すこともクライオスタットの内圧上昇の抑制やヘリウムガス回収の点で重要である。KEK ではこれまで 1 台の D1 実証機と、3 台の D1 実機の 1.9 K 励磁試験を行なってきた

[#] 235s117s@stu.kobe-u.ac.jp

た[2, 3]。実証機試験ではクエンチ保護ヒーター(QPH)[4]と固定抵抗器(25 mΩ)を用いたクエンチ保護システムを導入していたが、定格電流値付近で発生するクエンチでは外部へのエネルギー回収が不十分で、蒸発ガス量がガスバッグ容量を上回り緊急放出弁が作動しヘリウムロスに繋がった。その経緯から実機1号機試験においては非線形抵抗器である SiC 製バリスタ(Varistor, Metrosil®製)[5]を保護回路として導入して、遮断時の発生電圧の抑制とエネルギー回収の増加を図った。その結果、定格電流を超える受け入れ基準(ultimate current)までクエンチトレーニングに成功する事ができただけでなく、ヘリウムロスも防ぐ事ができた[6]。バリスタ1機の写真を Fig. 2 に、また、バリスタのパラメータを Table 2 に示す。

本研究では引き続き実施した2台のD1実機の励磁試験のデータも加えてバリスタ保護システムの性能評価を実施した。さらに、来たる実機試験に備えて異常検知方法の検討を行った。

Table 1: D1 Magnet Parameters

Magnetic Strength	5.60 T
Magnetic Length	6.26 m
Coil Aperture	150 mm
Operating Temperature	1.9 K
Nominal Current	12110 A
Ultimate Current	13231 A
Stored Energy at 12110 A	2.1 MJ

2. 磁石試験におけるバリスタの導入

バリスタは、Eq. (1) に示すようにパラメータ(C, β)によって表される I-V 特性を有する。また、KEK が今回導入したバリスタの I-V 特性を Fig. 3 に示す。

$$V = C \times I^\beta \quad (0 < \beta < 1) \quad (1)$$

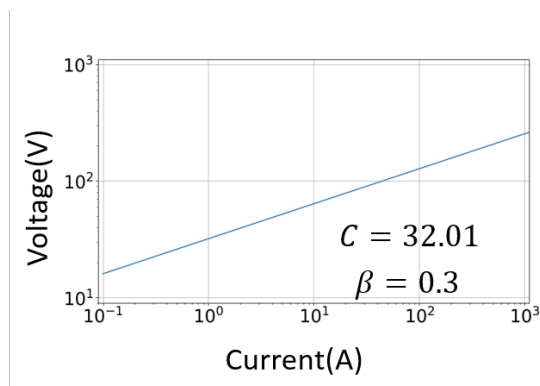


Figure 3: IV characteristics of a varistor.

回収抵抗にバリスタを用いることによる利点は、その非線形な I-V 特性からも分かるように大電流時に電圧を低く抑えることができるため、磁石の耐電圧仕様を満たしやすく、低電流においては比較的高電圧となるため効率よいエネルギー回収が同時に実現できる点にある。KEK における D1 磁石試験では Fig. 4 に示したようにバリスタ

5機の並列回路が組み込まれた保護回路を用いている。クエンチ時には、遮断スイッチである DCCB が OFF になり磁石電流はバリスタへと流れ込む。5機の並列回路で組まれたバリスタに何らかの異常が発生した際に、仕様通りに動かず偏流が起こる懸念がある。その理由は、

- 1) バリスタの個体差(C, β)
- 2) バリスタの温度依存性[7](温度が上昇すると、流入電流が増加する可能性)

である。そのため、これまでの磁石試験におけるバリスタの性能評価と今後の試験における異常検知手法の開発を行う必要がある。

Table 2: Varistor Parameters[6]

Varistor configuration	14 disks × 5units
Voltage at 15kA	575 V
Total absorbable energy	5 MJ
Rated current for each unit	3000 A
Maximum rated current for each unit	3500 A

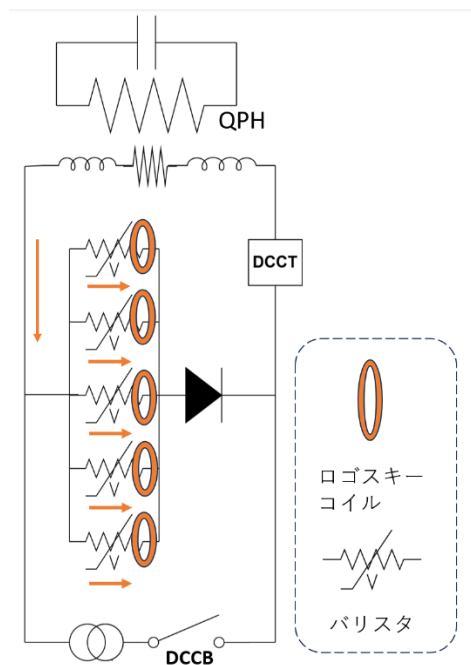


Figure 4: Quench protection circuit.

3. バリスタの性能評価

本章ではこれまで実施した3台のD1実機励磁試験のデータからバリスタ並列システムの性能評価を行なったので、この詳細について述べる。

3.1 バリスタ電流の測定方法

バリスタに流れる電流は Fig. 4 のように Rogowski Coil (CWT15LF) を用いて、クエンチ電流は DCCT を用いて測定する。DCCT で測定したクエンチ時の遮断電流波形とクエンチ電圧を Fig. 5 に示す。ここでは $t = 0(s)$ でク

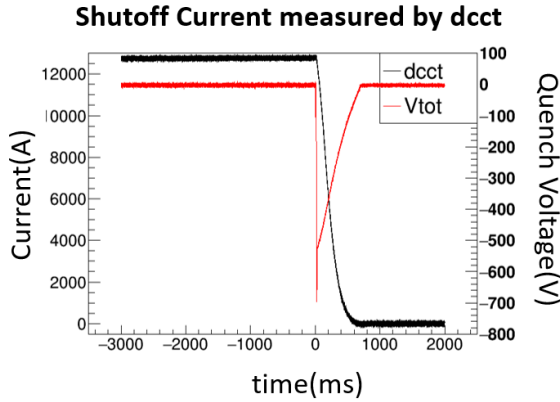


Figure 5: Shutoff current and quench voltage.

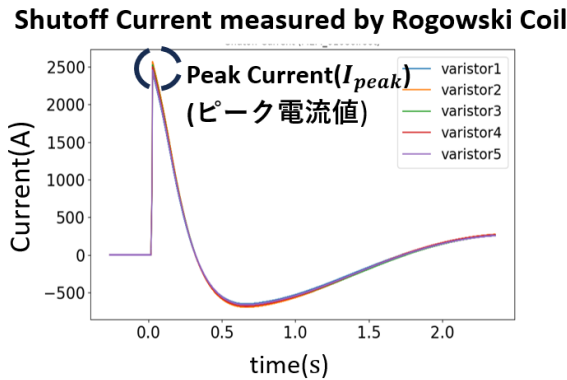


Figure 6: Shutoff current of each varistor.

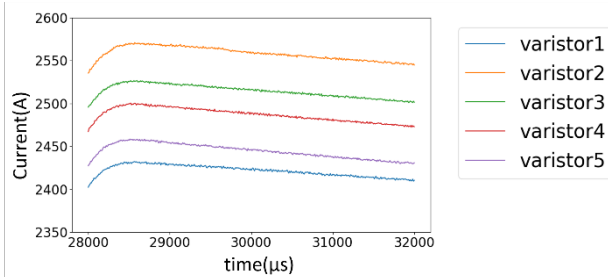


Figure 7: Shutoff current (peak values) of each varistor.

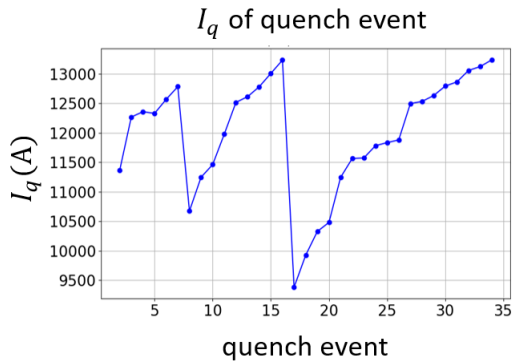


Figure 8: Quench current for each quench event.

エンチ検出器のトリガーが発報し、約 17ms 後に DCCB によって電流 (dcct, 黒線) が遮断されると同時にクエンチ電圧 (V_{tot} , 赤線) が発生する様子を示している。また、Fig. 6 と Fig. 7 に Rogowski Coil により得られた各バリスタに流れ込む電流波形を示す。ここではバリスタ 5 機の遮断電流波形が重ね書きされており、DCCB の遮断に伴いバリスタに電流が流れ込む様子を示している。Figure 7 は Fig. 6 の電流ピーク付近を拡大したものである。

3.2 バリスタ性能評価

バリスタの性能評価をピーク電流に注目して評価する。クエンチ電流値によって、ピーク電流値には大きく差があるため、以下の式のように重み W をつけて評価する。

$$I_{norm}(i) = W \times I_{peak} \quad (2)$$

$$W = 5/I_q \quad (3)$$

I_q はクエンチ電流を表し、クエンチイベントごとの I_q を Fig. 8 に示す。Equation (3) で求めた、 I_{norm} をクエンチイベントごとに並べた結果を Fig. 9 に示す。またそのばらつきを定量的に評価するため分散 V を以下の式によって求めた：

$$V = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (I_{norm}(i) - \overline{I_{norm}})^2 \quad (4)$$

Figure 10 に各クエンチイベントの分散 V を示す。

Figure 9 に示すように、バリスタの個体差により各 $I_{norm}(i)$ に違いが現れているが、その再現性は高く、全てのイベントを通してバリスタが安定して動作していることが分かる。イベントごとの各 $I_{norm}(i)$ の変動には相関があり、同様の振舞を示していることが分かる。また Fig. 10 から、すべてのイベントを通して、バリスタの分散は、 $V < 4.1 \times 10^{-4}$ と十分小さいことが分かった。このことから、バリスタ 5 台の並列回路において、各バリスタへの電流分岐の再現性は高く、安定して機能していると言える。

4. バリスタ偏流検知

本章では今後の D1 実機試験に向けて並列バリスタシステムの偏流の兆候を捉えるために検討している異常検知方法の詳細を述べる。

4.1 I_{norm} と I_q との相関

バリスタの偏流の兆候を検知する目的のため、まず I_{norm} と I_q との相関を調べ、その関係を定量的に表すことを試みた。

相関係数を求めるとき、 I_q と I_{norm} に正規母集団を仮定できないため、母集団分布を仮定しないで用いることができるスピアマンの順位相関係数を用いる[8]。スピアマンの順位相関係数は以下の式で書くことができる。標本 $X_i(I_q)$ の順位を R_i 、標本 $Y_i(I_{norm})$ の順位を S_i とすると

$$\hat{\rho}_s = \frac{\sum_1^n \{R_i - E_0(R_i)\} \{S_i - E_0(S_i)\}}{\sqrt{\sum_1^n \{R_i - E_0(R_i)\}^2 \sum_1^n \{S_i - E_0(S_i)\}^2}} \quad (5)$$

その結果が Fig. 11 である。それぞれの Varistor の I_{norm} と I_q の間の相関にはばらつきがあるが、総じて $\hat{\rho}_s > 0$ であり、varistor1, 2, 3, 4 に弱い正の相関がみられる。また、 $\sum I_{norm}$ と I_q の相関にも弱い正の相関がみられる。

次節では、この相関から外れるものを異常値として検知するための方法を考える。

4.2 ナダラヤ・ワトソン推定による定量的評価

標本に正規母集団を仮定できないため、ナダラヤ・ワトソン推定を用いたノンパラメトリック回帰を行う。ノンパラメトリック回帰を varistor1 について行った結果とその残差を Figs. 12, 13 にそれぞれ示す。この時、 I_{norm} と $I_q(i)$ は以下の式で標準化されたものであり、 E_0 を平均、 s を標準偏差として、

$$I_q(\text{Standardized}) = (I_q - E_0(I_q))/s_{I_q} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} I_{norm}(i)(\text{Standardized}) \\ = (I_{norm}(i) - E_0(I_{norm}(i)))/s_{I_{norm}(i)} \end{aligned} \quad (7)$$

と表される。回帰モデルは、

$$y = m(x) \quad (8)$$

と書け、回帰関数 $m(x)$ の推定量は、 I_{norm} を標準化したものを y_i 、 $I_q(i)$ を標準化したものを x_i として

$$\hat{m}(x) = \sum_{i=1}^n \omega(x_i, x) y_i \quad (9)$$

となる。この時、 ω は

$$\omega_i(x) = K\left(\frac{x - x_i}{h_x}\right) / \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h_x}\right) \quad (10)$$

$$K(u) = (2\pi)^{-1/2} e^{-u^2/2} \quad (11)$$

$$\hat{h} = 1.06\hat{\sigma}/n^{1/5} \quad (12)$$

と書くことができる[8, 9]。カーネル関数 $K(u)$ は Gauss 型を用いた(Eq. (11))。 \hat{h} は経験的に Eq. (12)の式で与えられる。以上の回帰モデルより、 I_{norm} と I_q の相関から外れたデータを定量的に評価できる。

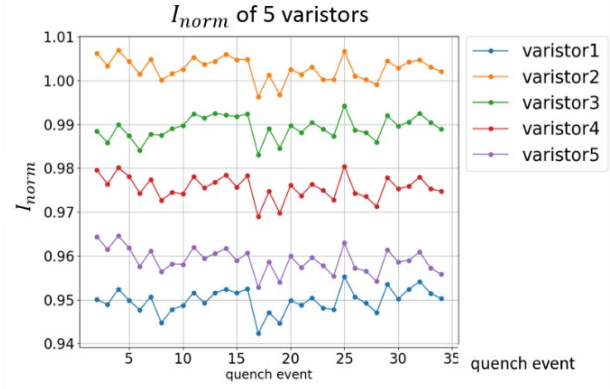


Figure 9: I_{norm} of each quench event.

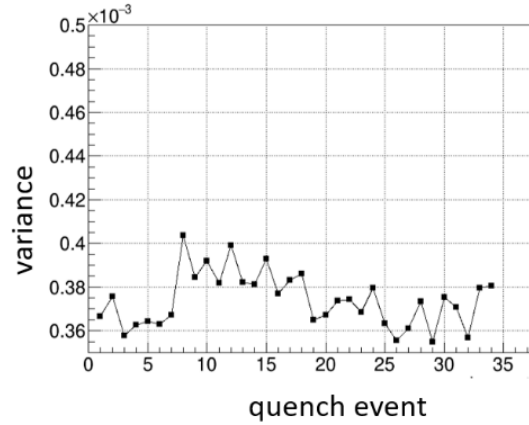


Figure 10: Variance in each quench event.

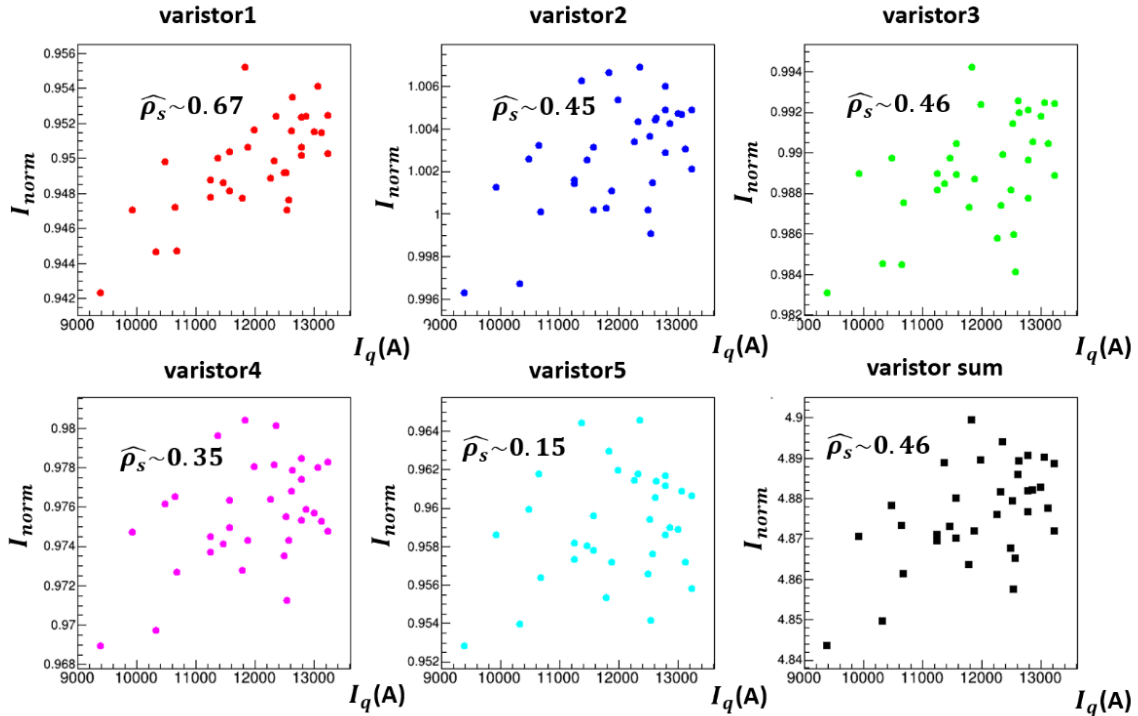


Figure 11: Correlation between I_{norm} and I_q .

今後は、さらなる異常検知システムの構築を進める。現在開発中のクエンチシミュレーションにおいて、上記の回帰モデルから差異が生じるような偏流モードを模索・再現し、これによってバリスタを含む保護回路システム並びに磁石に与える影響を見積もる。この結果を通して回帰モデルからの差異の閾値を決定する。また、検知システムを構築後は励磁試験システムへと実装する予定である。

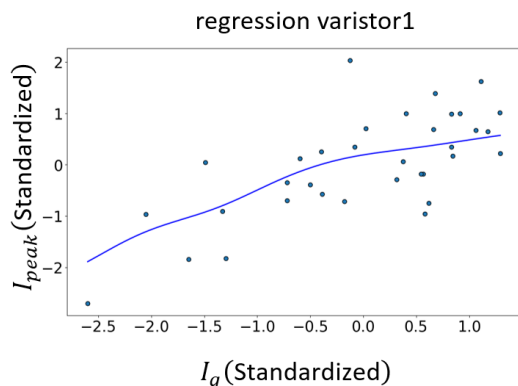


Figure 12: Plot of nonparametric regression using Nadaraya-Watson estimation applied to varistor1.

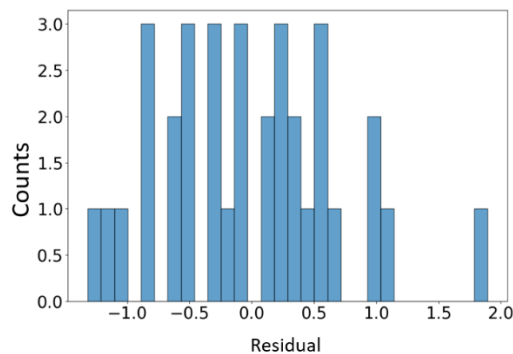


Figure 13: Histogram of residuals from the regression curve obtained in Fig. 12.

5. 結論と今後の課題

これまでの KEK D1 磁石試験をもとにして、並列バリスタによるクエンチ保護システムの性能評価を行ったところ、各バリスタの電流分岐の再現性が高く、安定して動作していることが分かった。

今後の課題として、 I_q と I_{norm} の各バリスタの関係を用いて、バリスタの個体差(β, C)を定量的に評価する。また、シミュレーションを用いて、バリスタ回路の偏流をモデル化し、本提案の異常検知の指標を模索する。そして今後の磁石試験で本提案の回帰モデルによる検知法を評価し実装を目指す。

参考文献

- [1] O. Bruing and L. Rossi, “The High Luminosity Large Hadron Collider”, WORLD SCIENTIFIC, 2024.
- [2] M. Sugano *et al.*, “Test result of a full-scale prototype of beam separation dipole magnet for the high-luminosity LHC upgrade”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **32**, Sep. 2022, 4003407.
- [3] K. Suzuki *et al.*, “Test Results of the First Series Magnet of Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **34**, Aug. 2024, 4001805.
- [4] K. Suzuki *et al.*, “Performance of the quench protection heater for the HL-LHC beam separation dipole”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **30**, Jun. 2020, 4701206.
- [5] T. Galvin *et al.*, “Experimental Examples of Quench Protection With Varistors to Reduce Quench Voltages and Hot-Spot Peak Temperatures”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **32**, Sep. 2022, 4702505.
- [6] K. Suzuki *et al.*, “Evaluation of the Parallel-Scheme Varistors as Energy-Extraction System for a Test Facility of Superconducting Accelerator Magnet”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **34**, Aug. 2024, 9501407.
- [7] T. Galvin *et al.*, “Characterisation of SiC Varistor Quench Protection Operating at 4 Kelvin for Use With Superconducting Magnets”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **34**, May 2024, 4702205.
- [8] 前園宜彦 ノンパラメトリック統計 共立出版.
- [9] 東京大学教養学部統計学教室 編 統計学入門 東京大学出版会.