

極低温環境下の電気絶縁技術

～超電導機器への適用と信頼性評価・不具合事例～

極低温環境下の電気絶縁技術調査専門委員会編

目 次

1. はじめに	3	4. 各分野における超電導機器の開発動向と 絶縁技術および要求事項	39
2. 各種絶縁材料の基礎的誘電・絶縁特性 および関連する物理特性	4	4.1 電力応用	39
2.1 液体	4	4.2 輸送機器	47
2.2 固体（バルク）	9	4.3 核融合・加速器	50
2.3 真空・気体	18	4.4 医療・産業応用	56
2.4 固体（沿面）	21	5. 信頼性評価と不具合事例	59
3. 各種絶縁材料の機器・デバイス適用に向けた 実用的誘電・絶縁特性	23	5.1 超電導ケーブルの安全性・信頼性評価事例	59
3.1 面積効果・体積効果	23	5.2 超電導機器の絶縁不具合事例	63
3.2 コンディショニング効果	25	5.3 標準化動向	67
3.3 寿命特性	26	6. おわりに	69
3.4 不純物の影響	28		
3.5 放射線の影響	31		
3.6 機械的・熱的ストレスの影響	34		

極低温環境下の電気絶縁技術調査専門委員会委員

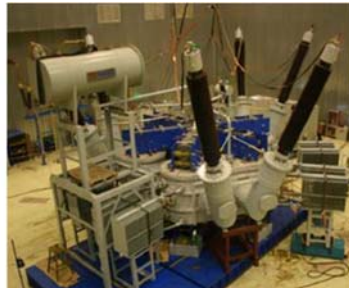
委員長	早川 直樹	(名古屋大学)	委員	桑田 稔	(日新電機)
幹事	増田 孝人	(住友電気工業)		向山 晋一	(古河電気工業)
幹事	山 納 康	(埼玉大学)		石井 登	(古河電気工業)
幹事補佐	川島 朋裕	(豊橋技術科学大学)		足立 和久	(昭和電線ケーブルシステム)
委員	長尾 雅行	(豊橋技術科学大学)		明石 一弥	(フジクラ)
	熊田亜紀子	(東京大学)		安達 昭則	(日立化成テクノサービス)
	白井 康之	(京都大学)		喜久山鈴恵	(旭・デュポン フラッシュ спан プロダクツ)
	水野 幸男	(名古屋工業大学)		梶谷 秀樹	(量子技術研究 開発機構)
	村本 裕二	(名城大学)			
	末廣 純也	(九州大学)			
	力石 浩孝	(核融合科学研究所)			
	辺見 努	(ITER機構)	途中退任	鳥居 慎治	(電力中央研究所)
	槇田 康博	(高エネルギー加速器 研究機構)		八木 正史	(古河電気工業)
	三村 智男	(東京電力 ホールディングス)		三堂 信博	(昭和電線ケーブルシステム)
	酒井 正弘	(東芝)		石井 正明	(旭・デュポン フラッシュ спан プロダクツ)
	門脇 慎	(日立製作所)		横山 将司	(旭・デュポン フラッシュ спан プロダクツ)
	佐藤 伸治	(三菱電機)			

1. はじめに

超電導送電は、現代社会のエネルギーインフラである電気エネルギーシステムの高効率化・高信頼度化・環境調和に貢献する次世代の革新技術として期待されている。また、科学技術イノベーション総合戦略において「革新的エネルギー変換・貯蔵・輸送技術の高度化」に向けて取り組むべき技術の一つとして位置付けられている。超電導送電を担う各種電力機器の研究開発が実フィールドにおける実証試験を中心として世界中で実施されており、配電系統の中電圧階級（10～77kV）で実績を挙げつつ、送電系統の高電圧階級（154～500kV）への展開も指向されている（図 1-1）。



(a) 超電導ケーブル⁽¹⁾
(275 kV, AC, 77 K)
(a) Superconducting cable⁽¹⁾
(275 KV, AC, 77 K)



(b) 超電導限流器⁽²⁾
(220 kV, AC, 77 K)
(b) Superconducting fault current limiter⁽²⁾
(220 KV, AC, 77 K)

図 1-1 超電導電力機器

Fig.1-1 Superconducting power apparatus



図 1-2 核融合マグネット (5kV, DC, 4.2K)

Fig.1-2 Fusion magnet (5kV, DC, 4.2K)

以上の背景により、電気学会 A 部門誘電・絶縁材料技術委員会の下に「極低温環境下の電気絶縁技術調査専門委員会」（CEI 委員会、CEI: Cryogenic Electrical Insulation）が 2015 年 10 月に設置され、極低温電気絶縁技術に特化した技術動向調査が開始された。極低温電気絶縁技術を調査項目に含む調査専門委員会は過去にいくつかみられる⁽³⁾⁽⁵⁾⁻⁽¹⁰⁾が、極低温電気絶縁技術に特化した調査専門委員会は、1996 年の技術報告 588 号⁽⁷⁾を発行した「極低温液体中の高電界現象と計測法」調査専門委員会以来、約 20 年振りである。この間、各種の超電導／極低温機器の開発・試験が行われ、不具合事例の経験とともに、実用的かつ合理的な絶縁設計に資する極低温電気絶縁の重要性が再認識されてきた。また、海外では、CEI 委員会と同時期の 2015 年 12 月に CIGRE WG D1.64

“Electrical Insulation Systems at Cryogenic Temperatures”が発足し、超電導電力機器の電気絶縁技術に関する調査が行われている。2018 年 5 月に中国・西安で開催された国際会議 ICPADM (International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials)2018 では、同 WG による Special Session⁽¹¹⁾が企画・実施された。CEI 委員会は、CIGRE WG D1.64 と連携して、極低温電気絶縁に関する技術情報の共有を行っている。

CEI 委員会は、大学、研究所、電力会社、電力機器メーカ、材料メーカより、絶縁材料、放電、高電圧、電力機器の分野横断型の専門家 25 名で構成されている。2015 年 10 月の設置以降、2018 年 9 月に解散するまでの 3 年間で 13 回の委員会を開催し、超電導電力機器、核融合マグネット、加速器などの開発に必要な不可欠な技術である極低温電気絶縁技術の発展に資することを目的として調査活動を行った。具体的には、極低温環境下における各種絶縁材料の基礎的な誘電・絶縁特性（技術報告 2 章）、超電導電力機器等の実用化に必要な誘電・絶縁特性（同 3 章）、それらの高性能化・高信頼度化・合理的設計に向けたユーザ・メーカから極低温電気絶縁技術への要求事項（同 4 章）、開発段階における安全性・信頼性評価事例や事故・不具合事例（同 5 章）などを調査した。CEI 委員会の中に 2 つの分科会（2 章・3 章、4 章・5 章）を設置して技術報告各章の具体的な内容を議論し、その後の全体会議において両分科会の議論内容を共有・集約した。また、2018 年 3 月には電気学会全国大会シンポジウムを企画・実施した⁽¹²⁾。本技術報告は、それらの調査結果をまとめたものである。

参考文献

- (1) 向山晋一、「超電導ケーブルの信頼性評価」、平成 30 年電気学会全国大会、S5-9
- (2) Hui Hong, et.al., “Design, fabrication, and operation of the cryogenic system for a 220kV/300MVA saturated iron-core superconducting fault current limiter”, 2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices
- (3) 「超電導電力機器とシステムの高性能・多機能化」、電気学会技術報告 1290 号(2013)
- (4) “Common Characteristics and Emerging Test Techniques for High Temperature Superconducting Power Equipment”, CIGRE WG D1.38 Technical Brochure, No.644 (December 2015)
- (5) 「極低温絶縁技術」、電気学会技術報告 2-260 号(1988)
- (6) 「超電導応用機器の電気絶縁技術」、電気学会技術報告 528 号(1995)
- (7) 「極低温液体中の高電界現象と計測法」、電気学会技術報告 588 号(1996)
- (8) 「液体中の高電界現象と機器適用技術～次世代の液体絶縁技術に向けて～」、電気学会技術報告 730 号(1999)
- (9) 「交流超電導技術の適用性」、電気学会技術報告 994 号(2005)
- (10) 「超電導応用機器設計基礎技術」、電気学会技術報告 1120 号(2008)
- (11) “Electrical insulation in equipment & systems at Cryogenic Temperatures”, Special session at International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (2018)
- (12) 超電導／極低温機器の開発・試験動向～主として、誘電・絶縁材料技術の観点から～, 電気学会全国大会シンポジウム S5 (2018)