

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Superconductivity –
Part 14: Superconducting power devices – General requirements for
characteristic tests of current leads designed for powering superconducting
devices**

**Supraconductivité –
Partie 14 : Dispositifs supraconducteurs de puissance – Exigences générales
pour les essais de caractéristiques d'aménées de courant conçues pour
alimenter des dispositifs supraconducteurs**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2014 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 14 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

More than 55 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: csc@iec.ch.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 14 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

Plus de 55 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: csc@iec.ch.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Superconductivity –

Part 14: Superconducting power devices – General requirements for characteristic tests of current leads designed for powering superconducting devices

Supraconductivité –

Partie 14 : Dispositifs supraconducteurs de puissance – Exigences générales pour les essais de caractéristiques d'aménées de courant conçues pour alimenter des dispositifs supraconducteurs

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

U

ICS 29.050

ISBN 978-2-8322-1468-8

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

CONTENTS

FOREWORD.....	3
INTRODUCTION.....	5
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	6
4 Principles	7
5 Characteristic test items	8
6 Characteristic test methods	9
6.1 Structure inspection	9
6.2 Stress/strain effect test.....	10
6.3 Thermal property test	10
6.4 Rated current-carrying test	11
6.5 Contact resistance test.....	12
6.6 Voltage drop test	12
6.7 High voltage test	12
6.8 Pressure drop test.....	13
6.9 Leak tightness test	13
6.10 Safety margin test	14
7 Reporting	15
8 Precautions	15
Annex A (informative) Supplementary information relating to Clauses 1 to 8.....	16
Annex B (informative) Typical current leads.....	18
Annex C (informative) Explanation figures to facilitate understanding of test methods	22
Annex D (informative) Test items and methods for a HTS component	24
Bibliography.....	26
Figure B.1 – Schematic diagram of self-cooled normal conducting current leads.....	18
Figure B.2 – Schematic diagram of forced flow cooled normal conducting current leads	19
Figure B.3 – Schematic diagram of current leads composed of forced flow cooled normal conducting section and HTS section in vacuum environment	19
Figure B.4 – Schematic diagram of current leads composed of forced flow cooled normal conducting section and HTS section in GHe environment	20
Figure B.5 – Schematic diagram of current leads composed of LN ₂ /GN ₂ /GHe cooled normal conducting section and self-sufficient evaporated helium cooled HTS section	20
Figure B.6 – Schematic diagram of current leads composed of conduction cooled normal conducting section and HTS section	21
Figure C.1 – Schematic drawing of a temperature profile during the rated current-carrying test	22
Figure C.2 – Schematic drawing of a pressure dependency of the breakdown voltage in the Paschen tightness test.....	22
Figure C.3 – Schematic drawing of a time dependency of the voltage rise at the quench test	23
Table 1 – Characteristic test items and test execution stages for current leads	9
Table D.1 – Characteristic test items for a HTS component	24

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –**Part 14: Superconducting power devices –
General requirements for characteristic tests of current
leads designed for powering superconducting devices**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61788-14 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

This bilingual version (2014-03) corresponds to the monolingual English version, published in 2010-06.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
90/244/FDIS	90/250/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

The French version of this standard has not been voted upon.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all parts of the IEC 61788 series, published under the general title *Superconductivity*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INTRODUCTION

Current leads are indispensable components of superconducting devices in practical uses such as MRI diagnostic equipment, NMR spectrometers, single crystal growth devices, SMES, particle accelerators such as Tevatron, HERA, RHIC and LHC, experimental test instruments for nuclear fusion reactors, such as ToreSupra, TRIAM, LHD, EAST, KSTAR, W7-X, JT-60SA and ITER, etc., and of advanced superconducting devices in the near future in practical uses such as magnetic levitated trains, superconducting fault current limiters, superconducting transformers, etc.

The major functions of current leads are to power high currents into superconducting devices and to minimize the overall heat load, including heat leakage from room temperature to cryogenic temperature and Joule heating through current leads. For this purpose, current leads are dramatically effective for lowering the overall heat load to use the high temperature superconducting component as a part of the current leads.

On the other hand, the current lead technologies applied to superconducting devices depend on each application, as well as on the manufacturer's experience and accumulated know-how. Due to their use as component parts, it is difficult to judge the compatibility, flexibility between devices, convenience, overall economical efficiency, etc of current leads. This may impede progress in the growth and development of superconducting equipment technology and its application to commercial activities, which is a cause for concern.

Consequently, it is judged industrially effective to clarify the definition of current leads to be applied to superconducting devices and to standardize the common characteristic test methods in a series of general rules.

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 14: Superconducting power devices – General requirements for characteristic tests of current leads designed for powering superconducting devices

1 Scope

This part of IEC 61788 provides general requirements for characteristic tests of conventional as well as superconducting current leads to be used for powering superconducting equipment.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050-815:2000, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 815: Superconductivity*

IEC 60071-1, *Insulation coordination – Part 1: Definitions, principles and rules*

IEC 60137, *Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions contained in IEC 60050-815:2000 as well as the following terms and definitions apply:

3.1

current lead

power lead

conductor to introduce electric current into a device with an insulation and a cooling channel especially when leading from room temperature to cryogenic temperature

[IEV 815-06-47]

3.2

normal conducting current lead

conventional current lead

current lead made only of a normal conducting section

3.3

superconducting current lead

current lead containing a superconducting section

NOTE A superconducting current lead consists of a normal conducting section from room temperature to intermediate temperature and a superconducting section from intermediate temperature to cryogenic temperature. In this standard, the superconducting section is mostly made by a high temperature superconductor (HTS).

3.4

non-gas cooled type current lead

current lead cooled by conduction cooling method

3.5**gas-cooled type current lead**

current lead cooled by a cooling gas

NOTE In some cases, the gas cooling is made between cooling via gas flow inside the leads and (additional) convection cooling on the outside surface.

3.6**self-cooled current lead**

vapour enthalpy cooled current lead

current lead capably cooled by an evaporated gas generated by heat load from current leads into cryogen

3.7**heat leakage**

non-current heat leakage

heat conducted from higher temperature portion into lower temperature portion of the current lead at zero current operation without any Joule heating

3.8**heat load**

total heat induced into a cryogenic system through the current leads under current-carrying operation

3.9**rated current heat load**

heat load at a rated current operation

4 Principles

The powering of superconducting equipment is made via components that provide the electrical link between the room temperature environment and the cryogenic temperature of the powered equipment. These components are called current leads. Since they operate in a gradient of temperature and they transport current into the cryogenic environment, they are one of the major sources of a heat leakage into the cryostat.

The current leads can be classified into two types:

- normal conducting current leads, made entirely from normal conducting section. These are usually joined at their cold end to a superconducting (SC) bus or link leading to the device being powered;
- high temperature superconducting (HTS) current leads, which incorporate a section of HTS material. A normal conducting section is necessary to conduct the current from room temperature to the warm end of the HTS section. The latter must be maintained at a sufficiently low temperature to ensure that it remains superconducting for the maximum rated current of the lead. The cold end of the HTS section is usually joined to the device by a SC bus.

Depending on the cooling method, the leads can be either non-gas-cooled or gas-cooled. Both types of cooling methods can be used if the lead is subdivided into two, hydraulically separated, sections. If the device being powered uses low temperature superconducting (LTS) material, the link to the lead is usually via LTS cables or wires.

Optimized, self-cooled normal conducting current leads conduct into the helium bath 1,1 W/kA [1]¹⁾ to 1,2 W/kA [2]. This value can be reduced substantially by using HTS material. HTS current

¹⁾ Figures in square brackets refer to the Bibliography.

leads have been extensively studied, designed and tested, and are already being integrated into large-scale systems [3] [4].

The design of a current lead is uniquely linked to the system within which it has to operate. The choice of materials, the cooling method, the geometry, the electrical characteristics and the admissible cryogenic consumptions are strongly influenced by boundary conditions imposed by the whole system. System requirements are electrical, cryogenic, and mechanical, and include the following:

- maximum operating current, operation mode, current ramp rate, insulation voltage, circuit time constant, ambient magnetic fields;
- cryogen availability, cryogen inlet/outlet temperature and pressure, admissible heat loads, time duration when the lead shall operate safely in case of failure of cryogen supply;
- the volume available for integration, including mechanical support, vacuum insulation, and connection to the hydraulic and electrical interfaces.

NOTE 1 The heat leakage for self-cooled current leads should make use of 1,2 W/kA in the case of large current capacities.

NOTE 2 Typical current leads based on these principles are shown in Annex B.

5 Characteristic test items

The following clauses describe the qualification tests that should be performed on a current lead at both room and cryogenic temperatures in order to verify its mechanical, electrical and thermal performance. It is assumed that the design of the current lead has been carried out in consideration of general versatility. Before application to an actual system, it is also necessary to do the optimization of the current lead according to the constraints imposed by each system. The characteristic test items shown in Table 1 should enable the user to verify if the current lead meets the specified requirements, and to judge if the test items meet the execution stage of the current lead. It is the responsibility of the user of this standard to select the appropriate tests according to Table 1 considering the boundary conditions of the current leads.

Table 1 – Characteristic test items and test execution stages for current leads

	Characteristic test category	Test items	Characteristic test execution stage		
			R&D ^a	Catalogue ^b	Receive ^c
1	Mechanical characteristics	Structure inspection		Yes	Yes
		Stress/strain effect test	Yes		
2	Thermal properties	Non-current heat leakage test	Yes	Yes	
		Rated current heat load test	Yes	Yes	
3	Electrical characteristics	Rated current-carrying test	Yes	Yes	
		Contact resistance test	Yes		
		High voltage test	Yes	Yes	
		Voltage drop test	Yes	Yes	
4	Hydraulic characteristics	Pressure drop test with rated gas flow	Yes	Yes	
		Leak tightness test	Yes		
5	Safety margin characteristics	Cryogen failure test	Yes	Yes	
		Quench test	Yes		
		Maximum pressure test	Yes	Yes	
NOTE 4 Characteristic test items and methods for the components of HTS section are shown in Annex D.					
a “R&D” means the test stage for basic research or trial productions of current lead systems.					
b “Catalogue” means the test stage for performed R&D or mass production of the current leads.					
c “Receive” means the test stage after installation of the current lead system in the site.					

6 Characteristic test methods

The test methods listed here are recommendations. The user may also select other test methods if required by specific applications or boundary conditions.

6.1 Structure inspection

6.1.1 Purpose

This test shall inspect dimensions, applicable materials, structure, structural state and so on as well as the thermal insulation property and leak tightness of the container in the target system.

6.1.2 Methods

The structure inspection test at room temperature shall inspect dimensions, applicable materials, structure, structural state and so on.

The structure inspection test at low temperature shall inspect visually the state of frost forming on the surface of a cryostat filled with cryogen or connected to a refrigerator. As for cryostats with the vacuum thermal insulating layer, it shall be confirmed that there is no malfunction in the layer such as tears and/or collapsing.

6.1.3 Results

Test results shall be collated with the specifications and fully reported.

6.2 Stress/strain effect test

6.2.1 Purpose

This test shall confirm the mechanical stress/strain effect on the current leads at room temperature and low temperatures.

6.2.2 Methods

A mechanical stress/strain level at room temperature and low temperatures in the target system shall be simulated, and mechanical stress/strain is loaded up to the maximum level below the elastic limit of the superconductor.

NOTE 1 The maximum load should be defined depending on the safety margin, and is typically 1,1 times the specification level.

NOTE 2 The test should be done repeatedly a specified number of times by distinguishing the condition between electromagnetic loading and thermal loading.

NOTE 3 Special notice should be taken of internal stress/strain appearing due to the cooling of the current leads from room temperature to operating conditions.

6.2.3 Results

Test results shall be collated with the specifications and fully reported.

6.3 Thermal property test

6.3.1 Non-current heat leakage test

6.3.1.1 Purpose

This test shall measure the non-current heat leakage, which is observed at zero current without any Joule heating, associated with the heat conduction from the room-temperature end to the intermediate-temperature portion, from the intermediate-temperature portion to the low-temperature end or from the room-temperature end to the low-temperature end of current leads.

6.3.1.2 Methods

The heat leakage shall be measured by the evaporation method of liquid cryogen, the enthalpy change method of forced flow cryogenic gas or the thermal conduction method using a cryocooler, depending on the cooling condition of the testing current leads.

a) Evaporation method

The current leads are installed in a special cryostat for the heat leakage test with known values of background heat leakage into the measurement region. In the cryostat the cold ends of the current leads are cooled with an appropriate coolant such as liquid helium and/or liquid nitrogen. The mass flow rate of evaporated coolant is measured at the outlet of the cryostat. The heat leakage through the current leads is evaluated by analyzing an increment in the mass flow rate of evaporated coolant by installing the current leads. Corresponding measurements should be carried out in the case of the intermediate-temperature portion.

b) Enthalpy change method

The current leads are installed in a cryostat with known values of background heat leakage into the measurement region. The temperature and mass flow controlled forced flow cryogenic gases such as supercritical helium are supplied to the cooling portions of the current leads. The heat leakage through the current leads is evaluated by the enthalpy changes of cryogenic gases between inlet and outlet of the current leads.

c) Thermal conduction method

The current leads are installed in a cryostat with known values of background heat leakage into the measurement region. The cooling portions of the current leads are thermally connected to the cold heads of the cryocooler. The heat leakage through the current leads is evaluated by the increment of heat loads to the cold heads of the cryocooler.

NOTE 1 In the evaporation method, a part of evaporated coolant remains in the cryostat as a low-temperature gas. Because the density of a low-temperature gas is large, it is necessary to correct the amount of the evaporated coolant when the mass flow rate is measured at the outlet of the cryostat.

NOTE 2 In R&D, the value of the heat leakage through the current lead is estimated from the numerical solution of the energy balance equation along the conductor of the current lead. Temperatures of cold and warm ends are taken to be boundary values of the energy balance equation. The form of the energy balance equation depends on the structure of the current leads. In the case of the gas-cooled normal conducting current leads, the energy balance equation may consist of such terms as heat conduction, ohmic heat generation and heat exchange with cooling gas.

6.3.1.3 Results

Test results shall be collated with the specifications and fully reported.

6.3.2 Rated current heat load test

6.3.2.1 Purpose

This test shall measure the amount of heat load at the rated current.

6.3.2.2 Methods

The methods shall be pursuant to those of the non-current heat leakage test without current (6.3.1.2).

6.3.2.3 Results

Test results shall be collated with the specifications and fully reported.

6.4 Rated current-carrying test

6.4.1 Purpose

This test shall confirm performances of the current leads at the rated current under the normal operation conditions.

6.4.2 Methods

To compare the performances of the current leads to the design values, the temperature profile shall be measured. The measuring points of temperature shall be at least the three positions of the room-temperature end, the intermediate-temperature portion and the low-temperature end. It shall be noticed that the temperature of the room-temperature end is affected by boundary conditions such as size, cooling condition of the bus bar, and so on.

The temperature rise shall be measured usually by the thermometer method or the resistance method.

Prior to the test, all cooling conditions of the refrigerator, the cryogen level or others shall be confirmed.

The current of the leads shall be maintained at the rated value until the cooling condition settles down in the steady state.

A typical example of temperature profile during the rated current-carrying test is shown in Clause C.1 of Annex C.

6.4.3 Results

Test results shall be collated with the specifications and fully reported.

6.5 Contact resistance test

6.5.1 Purpose

This test shall measure the contact resistance between HTS parts and normal conducting parts at intermediate-temperature portions. The contact resistance between HTS parts and LTS parts at low-temperature ends shall be measured, if it is required for the current leads.

6.5.2 Methods

The measurement of the total contact resistance, including the target contact section, shall be performed by the four-terminal method. The test results shall be corrected for the additional resistances due to other sections, except for that of the target contact.

NOTE For a current lead of small capacity less than a few kA, the influence of the two-dimensional current distribution on the contact resistance can be disregarded. However, the measurement and the correction by analysis or simulation considering the current distribution at the target joint shall be necessary for the current lead of the large capacity. Therefore, it is very difficult to get accurate value of the contact resistance. Even in this case, it is necessary to confirm the contact resistance is at least below the tolerance value by correcting the measurement with analysis or simulation considering the two-dimensional current distribution at the target joint.

6.5.3 Results

Test results shall be collated with the specifications and fully reported.

6.6 Voltage drop test

6.6.1 Purpose

This test shall confirm that the voltage drop of the current leads under the rated current is as expected from design calculations.

6.6.2 Methods

The cooling conditions shall conform to those of the rated current-carrying test.

The voltage drop shall be measured by the voltage taps between the room-temperature end and the low-temperature end.

6.6.3 Results

Test results shall be collated with the specifications and fully reported.

6.7 High voltage test

6.7.1 Purpose

This test shall confirm that there is no abnormality in the voltage drop property having an influence on the insulation performance of current leads.

6.7.2 Methods

Prior to the test, make sure that there is no problem associated with the insulation performance of the current leads, by using an insulation-resistance tester. Apply a given test voltage to current leads for more than one consecutive minute. The test voltage applied has to be in accordance with the requirements of the system in which the current lead shall be used.

For current leads for alternating-current equipment, the test shall be pursuant to the withstand voltage specification of the target equipment. For this, IEC 60071-1 and IEC 60137 shall be applied.

NOTE The Paschen tightness may be required by the system that demands high reliability. The Paschen tightness means that in case of a vacuum leak of the cryostat, the system must withstand the applied voltage even at the so called Paschen minimum that occurs at the pressure range of 0,1 kPa to 1 kPa. (A typical dependence of the breakdown voltage on pressure is shown in Clause C.2). To carry out this test, the current lead has to be installed in a vacuum vessel which is evacuated. After applying a required test voltage, the pressure in the vessel is slowly increased until normal pressure. During the whole process, the leak current between the current lead and ground potential is continuously monitored.

6.7.3 Results

Test results shall be collated with the specifications and fully reported.

6.8 Pressure drop test

6.8.1 Purpose

This test shall measure the pressure drop in the current lead at the rated pressure and the rated mass flow of cryogenic gas.

6.8.2 Methods

Pressure differences of the cryogenic gas between inlet and outlet of the current lead shall measure by a pressure gauge. The absolute pressure of inlet and/or outlet of the current lead should be specified.

6.8.3 Results

Test results shall be collated with the specifications and fully reported.

6.9 Leak tightness test

6.9.1 Purpose

This test shall confirm the adaptability on leak tightness between current leads and superconducting equipment.

6.9.2 Methods

For the gas-cooled type current leads, install them in a cryostat with the air-side open end sealed and confirm the leak tightness by a leak detector.

For the non-gas-cooled type current leads, this test shall be carried out under installation of the current leads into the cryostat, if requested.

6.9.3 Results

Test results shall be collated with each specification based on the type of the current leads and fully reported.

NOTE Test results shall be collated with each specification of the gas cooled type current leads or the non-gas cooled type current leads depending on different design conditions of the withstand hydraulic pressure and the leakage tightness based on the operation condition, the environmental condition etc. of the superconducting devices.

6.10 Safety margin test

6.10.1 Cryogen failure test

6.10.1.1 Purpose

This test shall perform the withstanding time test on the safety operation in case of failure of cryogen supply.

NOTE This test is usually performed on the gas-cooled type current leads.

6.10.1.2 Methods

Voltage taps and some thermometers shall be installed on the current lead. Time-based changes in voltage drop of the current lead and maximum temperature rises at the measuring points shall be measured. The cryogen shall be failed under the rated current, and then the voltage changes and maximum temperature rises shall be measured, while it requests that the maximum temperature rise part in the current lead is estimated by the calculation and/or the simulation when it is designed, and the thermometer is set up in the part.

6.10.1.3 Results

Test results shall be collated with the specifications and fully reported.

6.10.2 Quench test

6.10.2.1 Purpose

This test shall perform the safety margin test after the initiation of normal zone in the HTS component of the current lead. For the HTS component, the propagation speed of the normal zone is very slow, especially in the low voltage region. However the voltage drop of the HTS component increases rapidly after it reaches some threshold level. At the same time, the temperature of the HTS component increases rapidly and it causes the thermal runaway of the HTS component. The current of the current leads has to be decreased quickly after detecting the quench of the HTS component to prevent the burnout of the current leads. In order to detect the quench of the HTS component, the detectable voltage level is necessary, which is larger than the noise level. Therefore it is very important to measure the time between the detection of a quench and the thermal runaway.

6.10.2.2 Methods

The voltage taps, some thermometers and heaters shall be installed on the current lead as needed. The rated current is maintained in the current leads. A normal conducting section is compulsorily induced into the HTS component by a heater and/or by stopping cryogen flow or cryocooler. The subsequent spreading of the quench is observed. The time between the detection of the first measurable voltage increase for quench detection and the thermal runaway is measured. The safety margin of the HTS current lead is evaluated. A schematic time dependency of the voltage rise at the quench test is shown in Annex C.3.

6.10.2.3 Results

Test results shall be collated with the specifications and fully reported.

6.10.3 Maximum pressure test

6.10.3.1 Purpose

This test shall confirm the integrity of the current lead under the maximum pressure condition. The heat exchanger of the current lead has to withstand maximum pressure in fault conditions which is higher than in normal operation.

6.10.3.2 Methods

The current lead is pressurized at room temperature up to the maximum pressure by using the gas with low dew point. The integrity of the current lead is confirmed by the visual inspection and the tightness leak test.

NOTE Pressure gauges and some strain gauges are attached on the current lead, if necessary. Danger of pressurization by gas should be prevented by continuous monitoring of the sensors. The usual pressure proof test is done by using a liquid such as water for safety reasons. However, it is necessary to perform the maximum pressure test by using gas, so that the cryogenic equipment as well as the current leads may prevent blockage caused by retention of moisture.

6.10.3.3 Results

Test results shall be collated with the specifications and fully reported.

7 Reporting

The following data shall be reported:

- the outline of current leads;
- the test conditions;
- characteristic test results collating to the specifications;
- the findings acquired through them.

8 Precautions

Prior to the characteristic tests, make sure that test designers and persons involved are reminded of the following.

a) Electrical tests

The preventive means and countermeasure for electrical hazards shall be taken with room-temperature electrical tests and low-temperature electrical tests in mind.

b) Cryogen and generated gas

On low-temperature tests, preventive means and countermeasures for electrical hazards shall be taken relating to gas replacement, cryogen injection, cryogenic leakage, physical contact with cryogen, constantly-generated gas and intentionally-generated gas.

The cryogenic tests shall be based on the local legal regional laws.

Annex A (informative)

Supplementary information relating to Clauses 1 to 8

A.1 Scope

As applicable materials for superconducting current leads, in addition to the high-temperature copper oxide superconductors specified in this standard, superconductors such as MgB_2 , Nb_3Sn , Nb-Ti may be applicable, depending on designed temperatures.

A.2 Current lead structure

A.2.1 Normal conducting current lead (conventional current lead)

The conducting parts of this current lead are made of normal conducting material, including additional connecting terminals or reinforcing material at both ends.

A.2.2 Superconducting current lead

The conducting parts of this current lead are made of normal conducting material in the high temperature region. The conducting components in the intermediate and low temperature region are superconducting material, HTS or LTS, as required by the design temperature.

NOTE There may be other definitions of terms of temperature ranges.

A.3 Applicable materials

A.3.1 Normal conducting materials

As normal conducting materials for current leads as specified in this standard, copper, copper alloys, aluminium, or aluminium alloys are commonly used.

In addition, normal conducting materials that are used in current leads may take various forms, such as bulk, composite round wire, stranded wire, composite rectangular wire, tube-shaped wire, compacted-stranded wire, composite tape, laminated tape.

A.3.2 Superconducting materials

As superconducting materials to be installed in a part of current leads in this standard, Nb-Ti superconductor, Nb_3Sn compound superconductor, Bi-system oxide superconductor, Y-system oxide superconductor, MgB_2 compound superconductor and others are recommended.

In addition, superconducting materials that are used in current leads may take various forms, such as bulk, composite round wire, stranded wire, composite rectangular wire, compacted-stranded wire, composite tape, laminated tape.

A.3.3 Associated materials

Associated materials include the following:

- a) resistive materials: aluminium alloy, silver, silver alloy, copper, copper alloy (brass, beryllium-bronze, etc.), stainless steel and more;
- b) serving: glass fiber reinforced plastics (GFRP) and more;
- c) electrical insulation materials: GFRP, ceramics, polyimide tape and more

A.4 Characterizations

As test items for current leads, mechanical tests such as bend test, tensile test, vibration test, and drop test, and endurance tests of rapid cooling into liquid cryogen may be performed. This depends on the application and specification.

Annex B (informative)

Typical current leads

B.1 General

The schematic diagrams shown in the figures of this annex are provided to facilitate understanding of typical current leads. Because the current leads take various configurations according to the target system and the operational environment, these diagrams only cover a representative sample of possible designs.

B.2 Gas cooled type current leads

B.2.1 Self-cooled normal conducting current leads

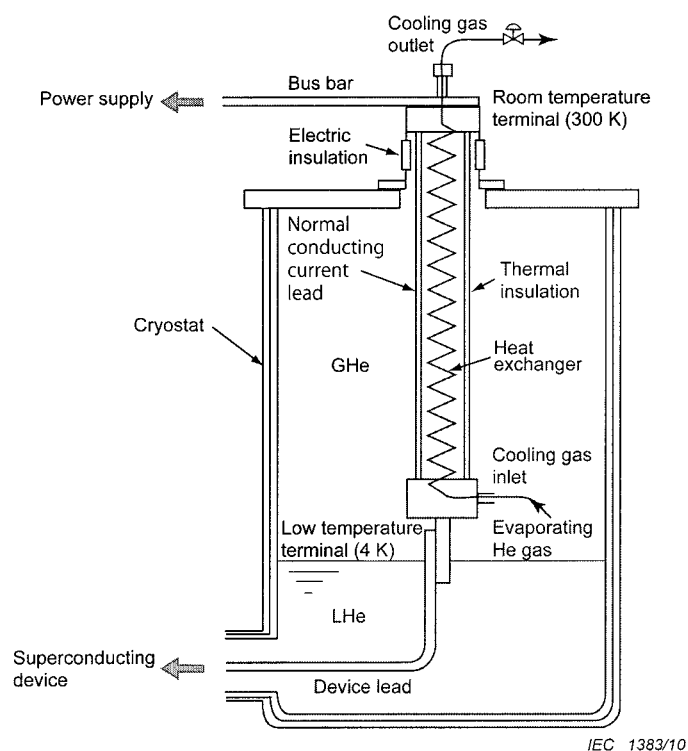


Figure B.1 – Schematic diagram of self-cooled normal conducting current leads

B.2.2 Forced flow cooled normal conducting current leads

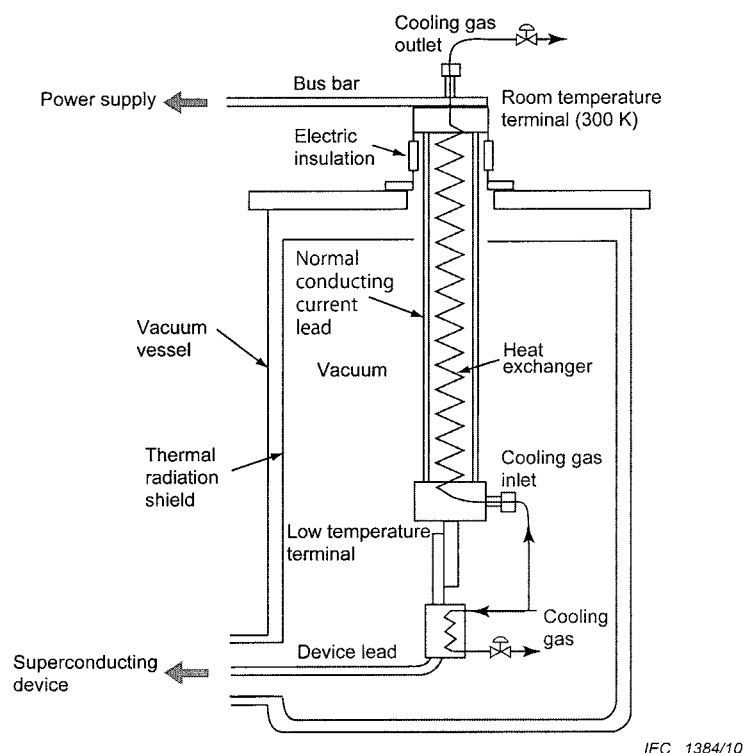


Figure B.2 – Schematic diagram of forced flow cooled normal conducting current leads

B.2.3 Current leads composed of forced flow cooled normal conducting section and HTS section in vacuum environment

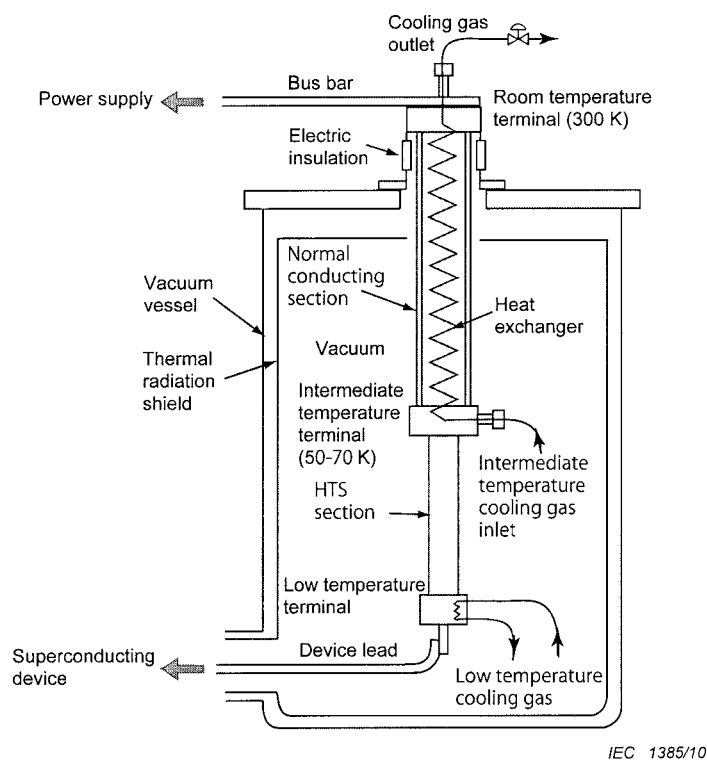
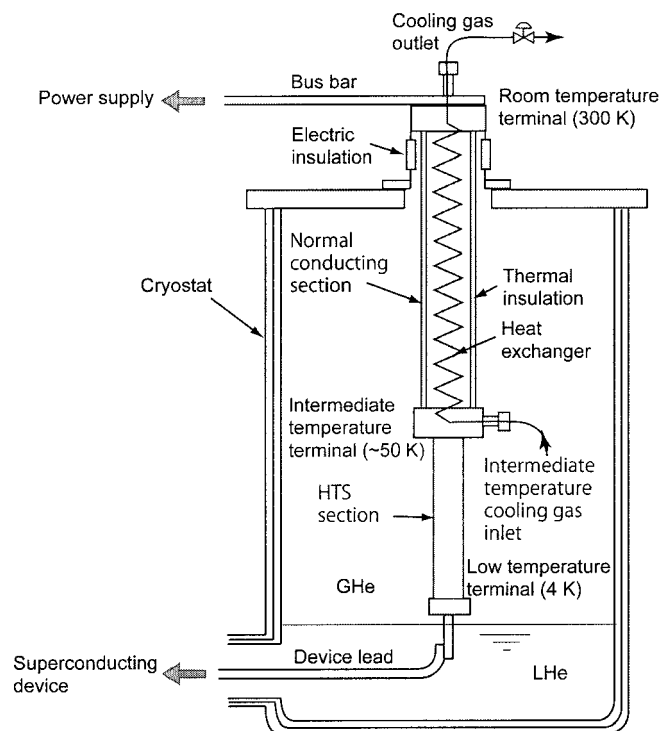


Figure B.3 – Schematic diagram of current leads composed of forced flow cooled normal conducting section and HTS section in vacuum environment

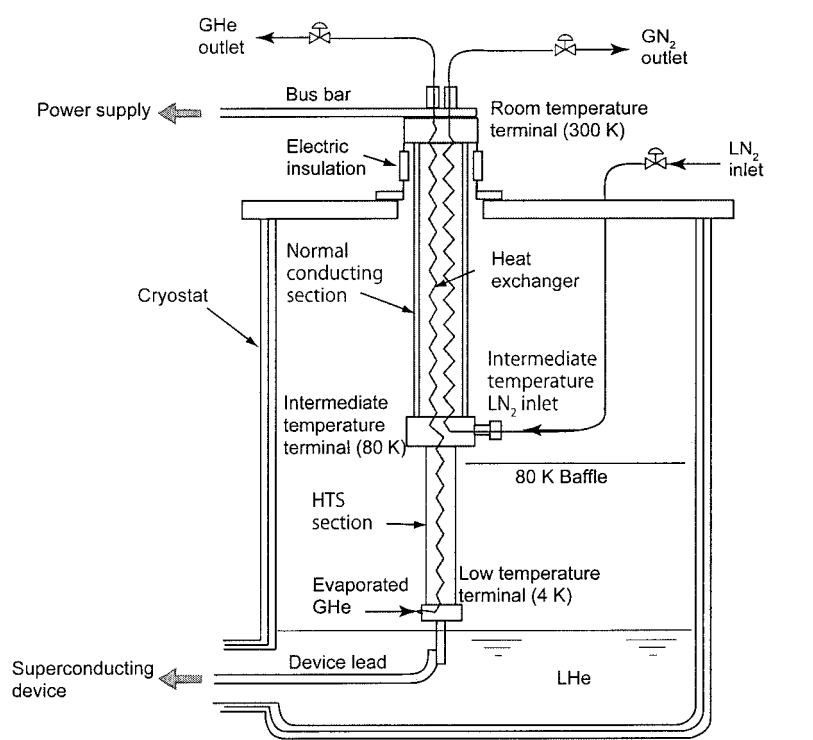
B.2.4 Current leads composed of forced flow cooled normal conducting section and HTS section in GHe environment



IEC 1386/10

Figure B.4 – Schematic diagram of current leads composed of forced flow cooled normal conducting section and HTS section in GHe environment

B.2.5 Current leads composed of LN₂/GN₂/GHe cooled normal conducting section and self-sufficient evaporated helium cooled HTS section



IEC 1387/10

Figure B.5 – Schematic diagram of current leads composed of LN₂/GN₂/GHe cooled normal conducting section and self-sufficient evaporated helium cooled HTS section

B.3 Non-gas-cooled type current lead

B.3.1 Current leads composed of conduction cooled normal conducting section and HTS section

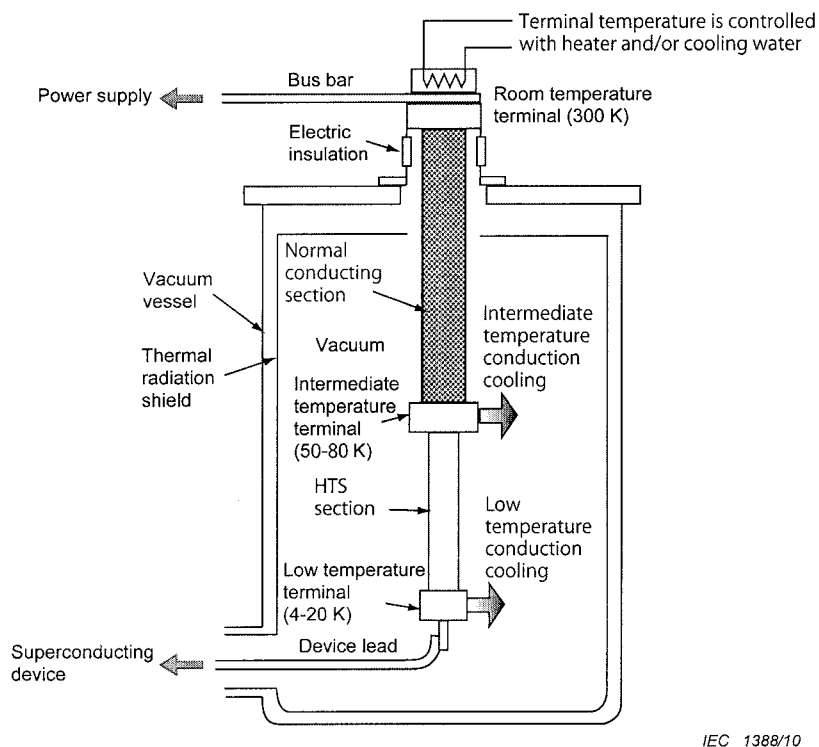


Figure B.6 – Schematic diagram of current leads composed of conduction cooled normal conducting section and HTS section

Annex C (informative)

Explanation figures to facilitate understanding of test methods

C.1 General

The figures in this annex are provided to facilitate understanding of the test methods. A temperature profile during the rated current-carrying test, a pressure dependency of the breakdown voltage at Paschen tightness test, and a time dependency of the voltage rise at the quench test of HTS current leads are taken as explanations of test methods.

C.2 Temperature profile during the rated current-carrying test

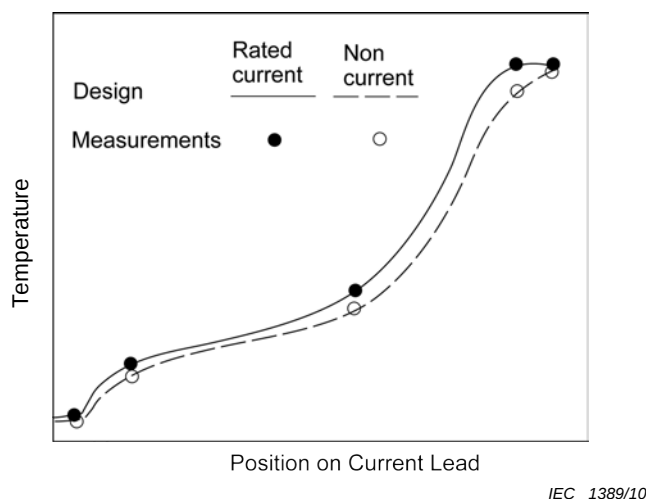


Figure C.1 – Schematic drawing of a temperature profile during the rated current-carrying test

C.3 Pressure dependency of the breakdown voltage in the Paschen tightness test

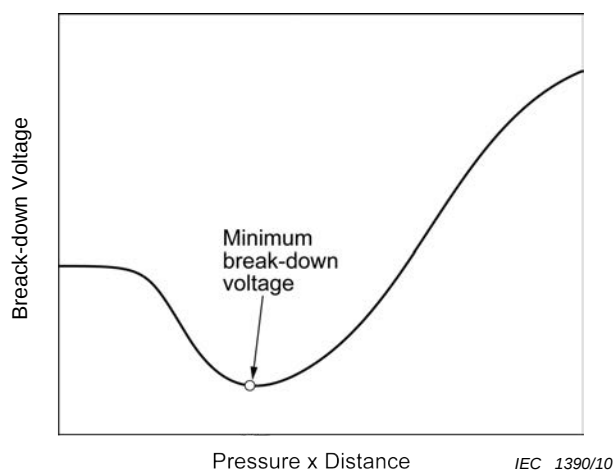
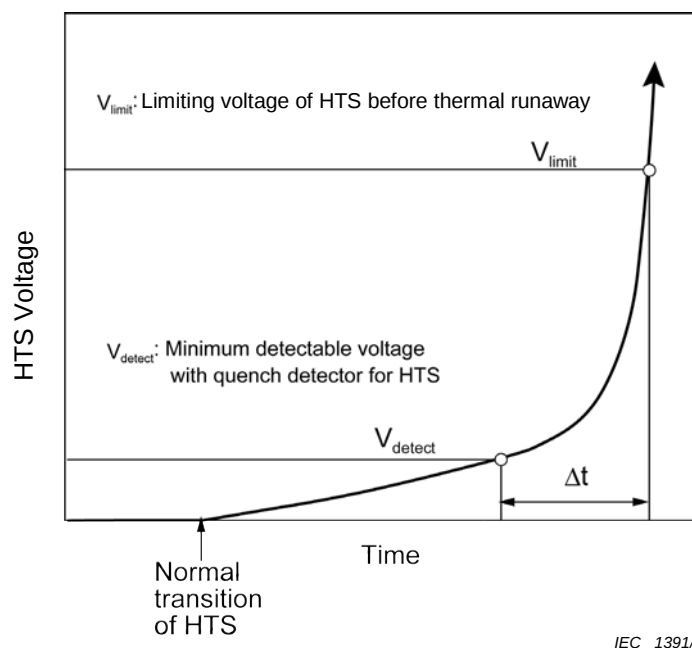


Figure C.2 – Schematic drawing of a pressure dependency of the breakdown voltage in the Paschen tightness test

C.4 Time dependency of the voltage rise in the quench test



NOTE Δt means a time difference due to a voltage rise from V_{detect} to V_{limit} , and corresponds to the safety margin of the current leads as mentioned in 6.10.2.

Figure C.3 – Schematic drawing of a time dependency of the voltage rise at the quench test

Annex D (informative)

Test items and methods for a HTS component

D.1 Scope

This standard describes the common characteristic of test items and methods for the entire current lead. For an application of HTS current leads, however, it is assumed that some manufacturers produce only one component of the HTS section for the current lead and other manufacturers or users will assemble these as the entire current lead. Here, the points are listed that should be especially noted about the test items and methods of a HTS component, which is the most important section of the superconducting current lead.

D.2 Characteristic test items for a HTS component

The characteristic test items for a HTS component shown in Table D.1 should enable the user to verify if the HTS component meets the specified requirements for the HTS section of the current lead, and to judge if the test items meet the execution stage of the superconducting current lead.

Table D.1 – Characteristic test items for a HTS component

	Characteristic test category	Test items	Characteristic test execution stage		
			R&D ^a	Catalogue ^b	Receive ^c
1	Mechanical characteristics	Structure inspection (section 6.1)		Yes	Yes
		Stress/strain effect test (section D.4.1)	Yes		
2	Thermal properties	Non-current heat leakage test (section 6.3.1)	Yes		
3	Electrical characteristics	Rated current-carrying test (section 6.4)	Yes	Yes	
4	Safety margin characteristics	Quench test (section 6.10.2)	Yes		
^a “R&D” means the test stage for basic researches or trial productions of the HTS component. ^b “Catalogue” means the test stage for performed R&D or mass-production of the HTS component. ^c “Receive” means the test stage in manufacturers or designers of the current lead systems.					

D.3 General test methods

Each characteristic test method may be applicable referring to section 6 of the main standard. A cooling condition, an electric insulation, a mechanical support, etc. can be simplified if equivalent to the condition that a HTS component is used as a superconducting section of the current lead.

D.4 Specified test methods

D.4.1 Purpose – Stress/strain effect test

This test shall confirm the mechanical and thermal stress/strain effect of the HTS component at room temperature and low temperatures.

D.4.2 Methods

A mechanical stress/strain level at room temperature and low temperatures in the HTS component shall be simulated, and mechanical stress/strain is loaded up to the maximum level below the elastic limit of the superconductor.

NOTE 1 The maximum load should be defined depending on the safety margin, and is typically 1,1 times the specification level.

NOTE 2 The test should be repeated a specified number of times by distinguishing the condition between electromagnetic loading and thermal loading.

NOTE 3 In the case of the HTS component using the Ag alloy sheathed Bi-system superconductors, electrical properties have been guaranteed practically after repeating the tensile test at room temperature and up to 1,1 times the elastic limit, which is defined by the sufficiently lowered 0,2 % proof stress/strain of the superconductors on experimental data or the related local rules.

D.4.3 Results

Test results shall be collated with the specifications and fully reported.

Bibliography

- [1] WILSON, MN., *Superconducting Magnets*. Oxford University Press, Oxford, 1983, pp. 256-272.
 - [2] LOCK, JM., *Cryogenics*, 1969, vol.9 pp. 438-442.
 - [3] BALLARINO, A., Current Leads for the LHC Magnet System. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2002, vol. 12 pp.1275-1280.
 - [4] BALLARINO, A., HTS current leads for the LHC magnet powering system. *Physica C*, 2002, 372-376 pp. 1413-1418.
 - [5] IEC 61788-3:2006, *Superconductivity – Part 3: Critical current measurement – DC critical current of Ag- and/or Ag alloy-sheathed Bi-2212 and Bi-2223 oxide superconductors*
 - [6] IEC 61788-10:2006, *Superconductivity – Part 10: Critical temperature measurement – Critical temperature of composite superconductors by a resistance method*
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	30
INTRODUCTION.....	32
1 Domaine d'application	33
2 Références normatives	33
3 Termes et définitions	33
4 Principes	34
5 Éléments des essais de caractéristiques	35
6 Méthodes d'essai de caractéristiques	36
6.1 Inspection de la structure	36
6.2 Essai d'effet de contraintes/déformations.....	37
6.3 Essai de propriété thermique	37
6.4 Essai de courant limite assigné.....	38
6.5 Essai de résistance de contact.....	39
6.6 Essai de chute de tension	39
6.7 Essai à haute tension.....	40
6.8 Essai de chute de pression	40
6.9 Essai d'étanchéité aux fuites.....	40
6.10 Essai de marge de sécurité.....	41
7 Rapport	42
8 Précautions	42
Annexe A (informative) Informations complémentaires concernant les Articles 1 à 8.....	44
Annexe B (informative) Amenées de courant types	46
Annexe C (informative) Figures explicatives destinées à faciliter la compréhension des méthodes d'essai	52
Annexe D (informative) Éléments et méthodes d'essai pour un composant HTS	55
Bibliographie.....	57
Figure B.1 – Dessin schématique d'amenées de courant conductrices normales auto-refroidies	46
Figure B.2 – Dessin schématique d'amenées de courant conductrices normales refroidies par écoulement forcé.....	47
Figure B.3 – Dessin schématique d'amenées de courant constituées d'une section conductrice normale refroidie par écoulement forcé et d'une section HTS dans un environnement sous vide	48
Figure B.4 – Dessin schématique d'amenées de courant constituées d'une section conductrice normale refroidie par écoulement forcé et d'une section HTS dans un environnement de GHe	49
Figure B.5 – Dessin schématiques d'amenées de courant constituées d'une section conductrice normale refroidie par LN ₂ /GN ₂ /GHe et d'une section HTS refroidie par hélium évaporé autosuffisante	50
Figure B.6 – Dessin schématique d'amenées de courant constituées d'une section conductrice normale refroidie par conduction et d'une section HTS.....	51
Figure C.1 – Dessin schématique d'un profil de température pendant l'essai de courant limite assigné.....	52
Figure C.2 – Dessin schématique de la dépendance de la tension de claquage par rapport à la pression dans l'essai d'étanchéité de Paschen.....	53

Figure C.3 – Dessin schématique de la dépendance de l'augmentation de tension par rapport au temps dans l'essai de quench	54
---	----

Tableau 1 – Éléments des essais de caractéristiques et étapes d'exécution des essais pour les amenées de courant.....	36
---	----

Tableau D.1 – Éléments des essais de caractéristiques pour un composant HTS	55
---	----

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 14 : Dispositifs supraconducteurs de puissance – Exigences générales pour les essais de caractéristiques d'amenées de courant conçues pour alimenter des dispositifs supraconducteurs

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61788-14 a été établie par le comité d'études 90 de la CEI: Supraconductivité.

La présente version bilingue (2014-03) correspond à la version anglaise monolingue publiée en 2010-06.

Le texte anglais de cette norme est issu des documents 90/244/FDIS et 90/250/RVD.

Le rapport de vote 90/250/RVD donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

La version française de cette norme n'a pas été soumise au vote.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 61788, présentées sous le titre général *Supraconductivité*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

INTRODUCTION

Les amenées de courant sont des composants indispensables des dispositifs supraconducteurs pour des utilisations pratiques telles que le matériel de diagnostic par IRM (Imagerie par résonance magnétique), les spectromètres à RMN (Résonance magnétique nucléaire), les dispositifs de croissance de monocristaux, le SMES (Stockage d'énergie magnétique supraconductrice), les accélérateurs de particules tels que Tevatron, HERA, RHIC et LHC, les appareils expérimentaux d'essai pour réacteurs à fusion nucléaire, tels que ToreSupra, TRIAM, LHD, EAST, KSTAR, W7-X, JT-60SA et ITER, etc., et des dispositifs supraconducteurs perfectionnés dans un futur proche dans des utilisations pratiques telles que les trains à sustentation magnétique (à supraconducteurs), les limiteurs de courant de défaut à supraconducteur, les transformateurs supraconducteurs, etc.

Les principales fonctions des amenées de courant sont la fourniture de courants forts à des dispositifs supraconducteurs et la minimisation de la charge calorifique globale, ce qui inclut les pertes de chaleur entre la température ambiante et la température cryogénique et l'échauffement par effet Joule à travers les amenées de courant. À cet effet, les amenées de courant sont extrêmement efficaces pour diminuer la charge calorifique globale pour utiliser le composant supraconducteur haute température critique en tant que partie des amenées de courant.

Par ailleurs, les technologies des amenées de courant appliquées aux dispositifs supraconducteurs dépendent de chaque application ainsi que de l'expérience et du savoir-faire accumulé du fabricant. En raison de leur utilisation comme éléments composants, il est difficile d'estimer la compatibilité, la souplesse entre dispositifs, la commodité, le rendement économique global, etc., des amenées de courant. Ceci peut entraver les progrès dans la croissance et l'élaboration d'une technologie de matériel supraconducteur et son application à des activités commerciales, ce qui est une cause d'inquiétude.

On estime en conséquence qu'il est industriellement efficace de clarifier la définition des amenées de courant à appliquer à des dispositifs supraconducteurs et de normaliser les méthodes d'essai de caractéristiques communes dans une série de règles générales.

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 14 : Dispositifs supraconducteurs de puissance – Exigences générales pour les essais de caractéristiques d'amenées de courant conçues pour alimenter des dispositifs supraconducteurs

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61788 fournit les exigences générales pour les essais de caractéristiques d'amenées de courant classiques, ainsi que supraconductrices, destinées à être utilisées pour alimenter des matériels supraconducteurs.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60050-815:2000, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 815: Supraconductivité*

CEI 60071-1, *Coordination de l'isolement – Partie 1: Définitions, principes et règles*

CEI 60137, *Traversées isolées pour tensions alternatives supérieures à 1 000 V*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions contenus dans la CEI 60050-815:2000, ainsi que les termes et définitions suivants, s'appliquent.

3.1

amenée de courant

amenée d'énergie

conducteur isolé électriquement, permettant d'introduire le courant électrique dans un dispositif, et comportant un canal de refroidissement, notamment quand il passe de la température ambiante à la température cryogénique

[VEI 815-06-47]

3.2

amenée de courant conductrice normale

amenée de courant classique

amenée de courant constituée d'une unique section conductrice normale

3.3

amenée de courant supraconductrice

amenée de courant contenant une section supraconductrice

NOTE Une amenée de courant supraconductrice consiste en une section conductrice normale de la température ambiante jusqu'à une température intermédiaire et une section supraconductrice de la température intermédiaire jusqu'à la température cryogénique. Dans la présente norme, la section supraconductrice est principalement constituée d'un supraconducteur haute température critique (HTS).

3.4

amenée de courant du type sans réfrigérant gazeux

amenée de courant refroidie par une méthode de refroidissement par conduction

3.5

amenée de courant du type à réfrigérant gazeux

amenée de courant refroidie par un réfrigérant gazeux

NOTE Dans certains cas, le refroidissement par gaz est effectué entre un refroidissement par l'intermédiaire d'un courant gazeux à l'intérieur des amenées et un refroidissement par convection (supplémentaire) sur la surface extérieure.

3.6

amenée de courant auto-refroidie

amenée de courant refroidie par enthalpie en phase vapeur

amenée de courant pouvant être refroidie par un gaz évaporé généré par une charge calorifique provenant des amenées de courant dans un fluide cryogénique

3.7

perte de chaleur

perte de chaleur sans courant

chaleur conduite d'une partie à plus haute température dans une partie à température inférieure de l'amenée de courant pour un fonctionnement à courant nul sans aucun échauffement par effet Joule

3.8

charge calorifique

chaleur totale induite dans un système cryogénique par l'intermédiaire des amenées de courant en fonctionnement conducteur

3.9

charge calorifique à courant assigné

charge calorifique en fonctionnement à courant assigné

4 Principes

L'alimentation d'un matériel supraconducteur s'effectue par l'intermédiaire de composants effectuant la liaison électrique entre l'environnement à température ambiante et la température cryogénique du matériel alimenté. Ces composants sont appelés amenées de courant. Puisqu'ils fonctionnent dans un gradient de température et qu'ils acheminent du courant dans l'environnement cryogénique, ils constituent l'une des principales sources de perte de chaleur dans le cryostat.

Les amenées de courant peuvent être classées en deux types :

- amenées de courant conductrices normales, réalisées entièrement à partir d'une section conductrice normale. Elles sont habituellement raccordées à leur extrémité froide à un bus supraconducteur (SC) ou à une liaison amenant au dispositif alimenté ;
- amenées de courant supraconducteur haute température critique (HTS), incorporant une section de matériau HTS. Une section conductrice normale est nécessaire pour conduire le courant de la température ambiante jusqu'à l'extrémité chaude de la section HTS. Cette dernière doit être maintenue à une température suffisamment basse pour garantir qu'elle reste supraconductrice pour le courant assigné maximal de l'amenée. L'extrémité froide de la section HTS est habituellement raccordée au dispositif par l'intermédiaire d'un bus SC.

Selon la méthode de refroidissement, les amenées peuvent être sans réfrigérant gazeux ou à réfrigérant gazeux. Les deux types de méthodes de refroidissement peuvent être utilisés si l'amenée est subdivisée en deux sections hydrauliquement séparées. Si le dispositif alimenté

utilise un matériau supraconducteur basse température critique (LTS), la liaison à l'amenée s'effectue habituellement par l'intermédiaire de câbles ou de fils LTS.

Des amenées de courant conductrices normales autos-refroidies optimisées conduisent dans le bain d'hélium de 1,1 W/kA [1]¹⁾ jusqu'à 1,2 W/kA [2]. Cette valeur peut être substantiellement réduite en utilisant un matériau HTS. Les amenées de courant HTS ont été largement étudiées, conçues et essayées et elles sont déjà intégrées dans des systèmes à grande échelle [3] [4].

La conception d'une amenée de courant est associée de façon univoque au système à l'intérieur de laquelle elle doit fonctionner. Le choix des matériaux, la méthode de refroidissement, la géométrie, les caractéristiques électriques et les consommations admissibles de fluide cryogénique sont fortement influencées par les conditions aux limites imposées par l'ensemble du système. Les exigences du système sont électriques, cryogéniques et mécaniques et elles comportent:

- le courant maximal de fonctionnement, le mode de fonctionnement, la vitesse de montée du courant, la tension d'isolation, la constante de temps du circuit, les champs magnétiques ambiants;
- la disponibilité du fluide cryogénique, la température et la pression d'entrée/sortie du fluide cryogénique, les charges thermiques admissibles, la durée pendant laquelle l'amenée doit fonctionner en toute sécurité en cas de défaillance de la fourniture de fluide cryogénique;
- le volume disponible pour l'intégration, incluant le support mécanique, l'isolation par le vide et la liaison aux interfaces hydrauliques et électriques.

NOTE 1 Pour les amenées de courant auto-refroidies, Il convient que la perte de chaleur utilise 1,2 W/kA dans le cas des capacités de courant élevées.

NOTE 2 Des amenées de courant types basées sur ces principes sont présentées à l'Annexe B.

5 Éléments des essais de caractéristiques

Les articles suivants décrivent les essais de qualification qu'il convient d'effectuer sur une amenée de courant à la fois à la température ambiante et à la température cryogénique afin de vérifier sa performance mécanique, électrique et thermique. On suppose que la conception de l'amenée de courant a été effectuée en tenant compte d'une grande souplesse. Avant application à un système réel, il est également nécessaire d'effectuer l'optimisation de l'amenée de courant en fonction des contraintes imposées par chaque système. Il convient que les éléments des essais de caractéristiques représentés dans le Tableau 1 permettent à l'utilisateur de vérifier si l'amenée de courant satisfait aux exigences spécifiées et d'estimer si les éléments des essais satisfont à l'étape d'exécution de l'amenée de courant. Il est de la responsabilité de l'utilisateur de la présente norme de choisir les essais appropriés selon le Tableau 1 en considérant les conditions aux limites des amenées de courant.

1) Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

**Tableau 1 – Éléments des essais de caractéristiques
et étapes d'exécution des essais pour les amenées de courant**

	Catégorie des essais de caractéristiques	Éléments des essais	Étape d'exécution des essais de caractéristiques		
			R&D ^a	Catalogue ^b	Réception ^c
1	Caractéristiques mécaniques	Inspection de la structure		Oui	Oui
		Essai d'effet de contraintes/déformations	Oui		
2	Propriétés thermiques	Essai de perte de chaleur sans courant	Oui	Oui	
		Essai de charge calorifique à courant assigné	Oui	Oui	
3	Caractéristiques électriques	Essai de courant limite assigné	Oui	Oui	
		Essai de résistance de contact	Oui		
		Essai à haute tension	Oui	Oui	
		Essai de chute de tension	Oui	Oui	
4	Caractéristiques hydrauliques	Essai de chute de pression avec courant gazeux assigné	Oui	Oui	
		Essai d'étanchéité aux fuites	Oui		
5	Caractéristiques de marge de sécurité	Essai de défaillance du fluide cryogénique	Oui	Oui	
		Essai de quench	Oui		
		Essai de pression maximale	Oui	Oui	
NOTE 4 Les éléments et les méthodes d'essai de caractéristiques pour les composants de la section HTS sont présentés à l'Annexe D.					
^a « R&D » signifie l'étape d'essai pour la recherche de base ou les fabrications d'essai de systèmes d'amenées de courant.					
^b « Catalogue » signifie l'étape d'essai pour fabrication R&D ou en grande quantité des amenées de courant.					
^c « Réception » signifie l'étape d'essai après installation du système d'amenée de courant sur le site.					

6 Méthodes d'essai de caractéristiques

Les méthodes d'essai ici énumérées sont des recommandations. L'utilisateur peut également choisir d'autres méthodes d'essai si des applications ou des conditions aux limites spécifiques le nécessitent.

6.1 Inspection de la structure

6.1.1 Objet

Cet essai doit vérifier les dimensions, les matériaux applicables, la structure, l'état structural et ainsi de suite, ainsi que la propriété d'isolation thermique et l'étanchéité aux fuites du récipient dans le système cible.

6.1.2 Méthodes

L'essai de vérification de structure à la température ambiante doit vérifier les dimensions, les matériaux applicables, la structure, l'état structural et ainsi de suite.

L'essai de vérification de structure à basse température doit vérifier visuellement l'état de formation de givre sur la surface d'un cryostat rempli de fluide cryogénique ou relié à un réfrigérateur. En ce qui concerne les cryostats avec la couche d'isolation thermique sous vide, on doit confirmer qu'il n'y a aucun dysfonctionnement dans la couche, par exemple des déchirements et/ou un affaissement.

6.1.3 Résultats

Les résultats des essais doivent être regroupés avec les spécifications et entièrement consignés.

6.2 Essai d'effet de contraintes/déformations

6.2.1 Objet

Cet essai doit confirmer l'effet de contraintes/déformations mécaniques sur les amenées de courant à la température ambiante et aux basses températures.

6.2.2 Méthodes

Un niveau de contraintes/déformations mécaniques à la température ambiante et aux basses températures dans le système cible doit être simulé et on augmente la contrainte/déformation mécanique jusqu'au niveau maximal précédant la limite élastique du supraconducteur.

NOTE 1 Il convient de définir la charge maximale en fonction de la marge de sécurité et celle-ci est généralement égale à 1,1 fois le niveau de spécification.

NOTE 2 Il convient d'effectuer l'essai de façon répétée, un certain nombre de fois, en distinguant l'état entre une charge électromagnétique et une charge thermique.

NOTE 3 Il convient de noter particulièrement les contraintes/déformations internes apparaissant en raison du refroidissement des amenées de courant de la température ambiante jusqu'aux conditions de fonctionnement.

6.2.3 Résultats

Les résultats des essais doivent être regroupés avec les spécifications et entièrement consignés.

6.3 Essai de propriété thermique

6.3.1 Essai de perte de chaleur sans courant

6.3.1.1 Objet

Cet essai doit mesurer la perte de chaleur sans courant qui est observée avec un courant nul sans aucun échauffement par effet Joule associé à la conduction de chaleur de l'extrémité à la température ambiante jusqu'à la partie à température intermédiaire, de la partie à température intermédiaire jusqu'à l'extrémité à basse température ou de l'extrémité à température ambiante jusqu'à l'extrémité à basse température des amenées de courant.

6.3.1.2 Méthodes

La perte de chaleur doit être mesurée par la méthode d'évaporation de fluide cryogénique liquide, la méthode de variation d'enthalpie de gaz cryogénique à écoulement forcé ou la méthode de conduction thermique utilisant un cryoréfrigérateur, en fonction de l'état de refroidissement des amenées de courant en essai.

a) Méthode par évaporation

Les amenées de courant sont installées dans un cryostat spécial pour l'essai de perte de chaleur avec des valeurs connues de perte de chaleur résiduelle dans la région de mesure. Dans le cryostat, les extrémités froides des amenées de courant sont refroidies avec un agent de refroidissement approprié tel que de l'hélium liquide et/ou de l'azote liquide. Le débit massique de l'agent de refroidissement évaporé est mesuré à la sortie du cryostat. La perte de chaleur à travers les amenées de courant est évaluée en analysant un incrément du débit massique d'agent de refroidissement évaporé en installant les amenées de courant. Il convient d'effectuer les mesures correspondantes dans le cas de la partie à température intermédiaire.

b) Méthode par variation d'enthalpie

Les amenées de courant sont installées dans un cryostat avec des valeurs connues de perte de chaleur résiduelle dans la région de mesure. Les gaz cryogéniques à écoulement forcé contrôlé par la température et le flux massique, par exemple l'hélium supercritique, sont

fournis aux parties de refroidissement des amenées de courant. La perte de chaleur à travers les amenées de courant est évaluée par les variations d'enthalpie des gaz cryogéniques entre l'entrée et la sortie des amenées de courant.

c) Méthode par conduction thermique

Les amenées de courant sont installées dans un cryostat avec des valeurs connues de perte de chaleur résiduelle dans la région de mesure. Les parties de refroidissement des amenées de courant sont reliées thermiquement aux têtes froides du cryoréfrigérateur. La perte de chaleur à travers les amenées de courant est évaluée par l'incrément des charges calorifiques vers les têtes froides du cryoréfrigérateur.

NOTE 1 Dans la méthode par évaporation, une partie de l'agent de refroidissement évaporé reste dans le cryostat comme un gaz à basse température. Puisque la densité du gaz à basse température est grande, il est nécessaire de corriger la quantité de courant évaporé lorsque le débit massique est mesuré à la sortie du cryostat

NOTE 2 En R&D, la valeur de la perte de chaleur à travers l'amenée de courant est estimée d'après la solution numérique de l'équation d'équilibre d'énergie sur le conducteur de l'amenée de courant. Les températures des extrémités froide et chaude sont prises comme valeurs aux limites de l'équation d'équilibre d'énergie. La forme de l'équation d'équilibre d'énergie dépend de la structure des amenées de courant. Dans le cas des amenées de courant conductrices normales à réfrigérant gazeux, l'équation d'équilibre d'énergie peut être constituée de termes tels que la conduction de chaleur, la génération ohmique de chaleur et l'échange de chaleur avec le gaz de refroidissement.

6.3.1.3 Résultats

Les résultats des essais doivent être regroupés avec les spécifications et entièrement consignés.

6.3.2 Essai de charge calorifique à courant assigné

6.3.2.1 Objet

Cet essai doit mesurer la valeur de la charge calorifique au courant assigné.

6.3.2.2 Méthodes

Ces méthodes doivent être conformes à celles de l'essai de perte de chaleur sans courant (6.3.1.2).

6.3.2.3 Résultats

Les résultats des essais doivent être regroupés avec les spécifications et entièrement consignés.

6.4 Essai de courant limite assigné

6.4.1 Objet

Cet essai doit confirmer les performances des amenées de courant au courant assigné dans les conditions normales de fonctionnement.

6.4.2 Méthodes

Pour comparer les performances des amenées de courant aux valeurs de conception, le profil de température doit être mesuré. Les points de mesure de température doivent être au moins les trois positions de l'extrémité à température ambiante, de la partie à température intermédiaire et de l'extrémité à basse température. On doit noter que la température de l'extrémité à température ambiante est affectée par les conditions aux limites telles que les dimensions, l'état de refroidissement de la barre de bus et ainsi de suite.

L'échauffement doit être habituellement mesuré par la méthode du thermomètre ou la méthode de la résistance.

Avant l'essai, toutes les conditions de refroidissement du réfrigérateur, du niveau du fluide cryogénique ou d'autres conditions, doivent être confirmées.

Le courant des amenées doit être maintenu à la valeur assignée jusqu'à ce que l'état de refroidissement se soit stabilisé au régime permanent.

Un exemple type de profil de température pendant l'essai de courant limite assigné est présenté à l'Article C.1 de l'Annexe C.

6.4.3 Résultats

Les résultats des essais doivent être regroupés avec les spécifications et entièrement consignés.

6.5 Essai de résistance de contact

6.5.1 Objet

Cet essai doit mesurer la résistance de contact entre les parties HTS et les parties conductrices normales aux parties à température intermédiaire. La résistance de contact entre les parties HTS et les parties LTS aux extrémités à basse température doit être mesurée si cela est requis pour les amenées de courant.

6.5.2 Méthodes

La mesure de la résistance de contact totale, incluant la section de contact cible, doit être réalisée par la méthode des quatre bornes. Les résultats des essais doivent être corrigés en fonction des résistances additionnelles dues aux autres sections, à l'exception de celle du contact cible.

NOTE Pour une amenée de courant de faible capacité, inférieure à quelques kA, l'influence de la répartition bidimensionnelle du courant sur la résistance de contact peut être ignorée. Toutefois, la mesure et la correction par analyse ou simulation tenant compte de la distribution de courant à la jonction cible doivent être nécessaires pour l'amenée de courant de grande capacité. Il est donc très difficile d'obtenir une valeur précise de la résistance de contact. Même dans ce cas, il est nécessaire de confirmer que la résistance de contact est au moins inférieure à la valeur de tolérance en corrigeant la mesure avec une analyse ou une simulation tenant compte de la distribution bidimensionnelle du courant à la jonction cible.

6.5.3 Résultats

Les résultats des essais doivent être regroupés avec les spécifications et entièrement consignés.

6.6 Essai de chute de tension

6.6.1 Objet

Cet essai doit confirmer que la chute de tension des amenées de courant au courant assigné est celle qui est attendue des calculs par conception.

6.6.2 Méthodes

Les conditions de refroidissement doivent être conformes à celles de l'essai de courant limite assigné.

La chute de tension doit être mesurée par les prises de tension entre l'extrémité à température ambiante et l'extrémité à basse température.

6.6.3 Résultats

Les résultats des essais doivent être regroupés avec les spécifications et entièrement consignés.

6.7 Essai à haute tension

6.7.1 Objet

Cet essai doit confirmer qu'aucune anomalie de la propriété de chute de tension n'a d'influence sur la performance d'isolation des amenées de courant.

6.7.2 Méthodes

Avant l'essai, s'assurer qu'il n'y aucun problème associé à la performance d'isolation des amenées de courant en utilisant un appareil de mesure de résistance d'isolation. Appliquer une tension d'essai donnée aux amenées de courant pendant plus d'une minute. La tension d'essai appliquée doit être conforme aux exigences du système dans lequel l'amenée de courant doit être utilisée.

Pour les amenées pour matériel en courant alternatif, l'essai doit être conforme à la spécification de tension de tenue du matériel cible. À cet effet, la CEI 60071-1 et la CEI 60137 doivent être appliquées.

NOTE L'étanchéité de Paschen peut être requise par le système nécessitant une grande fiabilité. L'étanchéité de Paschen signifie qu'en cas de fuite de vide du cryostat, il faut que le système supporte la tension appliquée même au minimum dit de Paschen apparaissant dans la plage de pressions de 0,1 kPa à 1 kPa. (Une dépendance type de la tension de claquage par rapport à la pression est présentée à l'Article C.2). Pour exécuter cet essai, il convient que l'amenée de courant soit installée dans un récipient dans lequel le vide a été fait. Après application d'une tension d'essai requise, la pression dans le récipient est lentement augmentée jusqu'à la pression normale. Pendant la totalité du processus, le courant de fuite entre l'amenée de courant et le potentiel de terre est surveillé en continu.

6.7.3 Résultats

Les résultats des essais doivent être regroupés avec les spécifications et entièrement consignés.

6.8 Essai de chute de pression

6.8.1 Objet

Cet essai doit mesurer la chute de pression dans l'amenée de courant à la pression assignée et pour le débit massique assigné du gaz cryogénique.

6.8.2 Méthodes

Les différences de pression du gaz cryogénique entre l'entrée et la sortie de l'amenée de courant doivent être mesurées au moyen d'un manomètre. Il convient de spécifier la pression absolue de l'entrée et/ou de la sortie de l'amenée de courant.

6.8.3 Résultats

Les résultats des essais doivent être regroupés avec les spécifications et entièrement consignés.

6.9 Essai d'étanchéité aux fuites

6.9.1 Objet

Cet essai doit confirmer l'adaptabilité à l'étanchéité aux fuites entre les amenées de courant et le matériel supraconducteur.

6.9.2 Méthodes

Pour les amenées de courant du type à réfrigérant gazeux, les installer dans un cryostat, l'extrémité d'ouverture à l'air libre étant hermétiquement fermée et confirmer l'étanchéité aux fuites par un détecteur de fuite.

Pour les amenées de courant du type sans réfrigérant gazeux, cet essai doit être effectué à l'installation des amenées de courant dans le cryostat, si nécessaire.

6.9.3 Résultats

Les résultats des essais doivent être regroupés avec chaque spécification basée sur le type d'amenée de courant et entièrement consignés.

NOTE Les résultats des essais doivent être regroupés avec chaque spécification des amenées de courant du type à réfrigérant gazeux ou des amenées de courant du type sans réfrigérant gazeux pour différentes conditions de conception de la pression de tenue hydraulique et d'étanchéité aux fuites en se basant sur les conditions de fonctionnement, les conditions liées à l'environnement, etc., des dispositifs supraconducteurs.

6.10 Essai de marge de sécurité

6.10.1 Essai de défaillance du fluide cryogénique

6.10.1.1 Objet

Cet essai doit être constitué de l'essai de tenue au temps sur le fonctionnement de sécurité en cas de défaillance de la fourniture de fluide cryogénique.

NOTE Cet essai est habituellement réalisé sur les amenées de courant du type à réfrigérant gazeux.

6.10.1.2 Méthodes

Des prises de tension et quelques thermomètres doivent être installés sur l'amenée de courant. Les variations dans le temps de la chute de tension de l'amenée de courant et les échauffements maximaux aux points de mesure doivent être mesurés. Le fluide cryogénique doit être interrompu au courant assigné et les variations de tension et les échauffements maximaux doivent ensuite être mesurés, bien qu'il soit nécessaire que la partie d'échauffement maximal dans l'amenée de courant soit estimée par le calcul et/ou la simulation à la conception et que le thermomètre soit mis en service dans la partie.

6.10.1.3 Résultats

Les résultats des essais doivent être regroupés avec les spécifications et entièrement consignés.

6.10.2 Essai de quench

6.10.2.1 Objet

Cet essai doit être constitué de l'essai de marge de sécurité après initialisation de la zone normale dans le composant HTS de l'amenée de courant. Pour le composant HTS, la vitesse de propagation de la zone normale est très lente, en particulier dans la région à basse tension.

Toutefois, la chute de tension du composant HTS augmente rapidement après avoir atteint un certain niveau de seuil. En même temps, la température du composant HTS augmente rapidement et ceci provoque l'excursion thermique du composant HTS. Pour empêcher le claquage des amenées de courant, après avoir détecté le quench du composant HTS on doit rapidement diminuer le courant dans les amenées de courant. Pour détecter le quench du composant HTS, le niveau de tension détectable est nécessaire, et il est supérieur au niveau de bruit. Il est donc très important de mesurer le temps entre la détection d'un quench et l'excursion thermique.

6.10.2.2 Méthodes

Les prises de tension, quelques thermomètres et des éléments chauffants doivent être installés sur l'amenée de courant, selon les besoins. Le courant assigné est maintenu dans les amenées de courant. Une section conductrice normale est obligatoirement induite dans le composant HTS par un élément de chauffage et/ou en arrêtant le flux de fluide cryogénique ou le cryoréfrigérateur. L'extension de quench qui suit est observée. Le temps compris entre la détection de la première tension mesurable pour la détection de quench et l'excursion thermique est mesuré. La marge de sécurité de l'amenée de courant HTS est évaluée. Un schéma de la dépendance de l'augmentation de tension par rapport au temps dans l'essai de quench est présenté à l'Annexe C.3.

6.10.2.3 Résultats

Les résultats des essais doivent être regroupés avec les spécifications et entièrement consignés.

6.10.3 Essai de pression maximale

6.10.3.1 Objet

Cet essai doit confirmer l'intégrité de l'amenée de courant dans les conditions de pression maximale. L'échangeur de chaleur de l'amenée de courant doit supporter la pression maximale dans des conditions de défaut, celle-ci étant plus grande que dans un fonctionnement normal.

6.10.3.2 Méthodes

L'amenée de courant est pressurisée à la température ambiante jusqu'à la pression maximale en utilisant le gaz avec le point de rosée bas. L'intégrité de l'amenée de courant est confirmée par examen visuel et par l'essai de fuite d'étanchéité.

NOTE Si nécessaire, des manomètres et quelques jauges de contrainte sont fixées à l'amenée de courant. Il convient de prévenir le danger de la pressurisation par gaz en surveillant les capteurs en continu. L'essai périodique de pression habituel est réalisé en utilisant un liquide tel que de l'eau, et ce pour des raisons de sécurité. Il est toutefois nécessaire de réaliser l'essai de pression maximale en utilisant un gaz, de façon que le matériel cryogénique ainsi que les amenées de courant puissent empêcher tout blocage provoqué par la rétention d'humidité.

6.10.3.3 Résultats

Les résultats des essais doivent être regroupés avec les spécifications et entièrement consignés.

7 Rapport

Les données suivantes doivent être consignées:

- implantation des amenées de courant;
- conditions d'essai;
- résultats des essais de caractéristiques consignés par rapport aux spécifications;
- découvertes qui en découlent.

8 Précautions

Avant les essais de caractéristiques, s'assurer que les concepteurs des essais et les personnes impliquées soient informés de ce qui suit :

- a) Essais électrique

Les moyens de prévention doivent être adoptés et des mesures contre les dangers électriques doivent être prises en pensant aux essais électriques à température ambiante et aux essais électriques à basse température.

b) Fluide cryogénique et gaz générés

Pour les essais à basse température, des moyens de prévention doivent être adoptés et des mesures contre les dangers électriques doivent être prises en ce qui concerne le remplacement du gaz, l'injection de fluide cryogénique, une fuite de liquide cryogénique, un contact physique avec le fluide cryogénique, une génération constante de gaz et une génération volontaire de gaz.

Les essais cryogéniques doivent être basés sur la réglementation locale applicable.

Annexe A (informative)

Informations complémentaires concernant les Articles 1 à 8

A.1 Domaine d'application

En tant que matériaux applicables pour les amenées de courant supraconductrices, en plus des supraconducteurs en oxyde de cuivre à haute température spécifiés dans la présente norme, des supraconducteurs tels que MgB_2 , Nb_3Sn , Nb-Ti peuvent s'appliquer, en fonction des températures prévues.

A.2 Structure de l'amenée de courant

A.2.1 Amenée de courant conductrice normale (amenée de courant classique)

Les parties conductrices de cette amenée de courant sont faites d'un matériau conducteur normal, incluant des bornes de connexions supplémentaires ou un matériau de renfort aux deux extrémités.

A.2.2 Amenée de courant supraconductrice

Les parties conductrices de cette amenée de courant sont faites d'un matériau conducteur normal dans la région des hautes températures. Les composants conducteurs des régions à température intermédiaire et basse sont en matériau supraconducteur, HTS ou LTS, selon les exigences de la température prévue.

NOTE D'autres définitions des termes des plages de températures peuvent exister.

A.3 Matériaux applicables

A.3.1 Matériaux conducteurs normaux

En tant que matériaux conducteurs normaux pour les amenées de courant comme spécifié dans la présente norme, on utilise couramment du cuivre, des alliages de cuivre, de l'aluminium ou des alliages d'aluminium.

De plus, les matériaux conducteurs normaux qui sont utilisés dans les amenées de courant peuvent prendre diverses formes, par exemple un fil rond composite massif, un fil divisé, un fil rectangulaire composite, un fil en forme de tube, un fil divisé compacté, une bande composite, une bande stratifiée.

A.3.2 Matériaux supraconducteurs

En tant que matériaux supraconducteurs destinés à être installés dans une partie des amenées de courant selon la présente norme, un supraconducteur en Nb-Ti, un supraconducteur composite en Nb_3Sn , un supraconducteur oxyde de système de Bi, un supraconducteur oxyde de système de Y, un supraconducteur composite en MgB_2 ainsi que d'autres, sont recommandés.

De plus, les matériaux supraconducteurs qui sont utilisés dans les amenées de courant peuvent prendre diverses formes, par exemple un fil rond composite massif, un fil divisé, un fil rectangulaire composite, un fil divisé compacté, une bande composite, une bande stratifiée.

A.3.3 Matériaux associés

Les matériaux associés comportent :

- a) des matériaux résistifs: alliage d'aluminium, argent, alliage argent, cuivre, alliage de cuivre (laiton, bronze-béryllium, etc.), acier inoxydable et d'autres;
- b) matelas extérieur: résines époxy renforcées par des fibres de verre (GFRP) et d'autres;
- c) matériaux d'isolation électrique: GFRP, céramique, bande de polyimide et d'autres.

A.4 Caractérisations

Comme éléments d'essai pour les amenées de courant, des essais mécaniques tels qu'un essai en flexion, un essai en traction, un essai de vibration et un essai de chute, ainsi que des essais d'endurance de refroidissement rapide dans le fluide cryogénique liquide, peuvent être effectués. Ceci dépend de l'application et de la spécification.

Annexe B (informative)

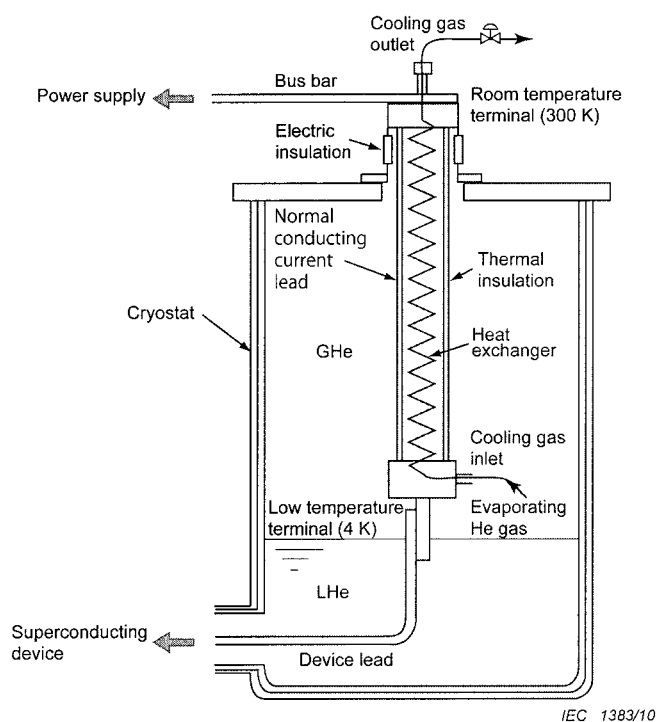
Amenées de courant types

B.1 Généralités

Les dessins schématiques représentés sur les figures de cette annexe sont fournis pour faciliter la compréhension des amenées de courant type. Puisque les amenées de courant adoptent des configurations variées en fonction du système cible et de l'environnement de fonctionnement, ces schémas ne couvrent qu'un exemple représentatif de conceptions possibles.

B.2 Amenées de courant du type à réfrigérant gazeux

B.2.1 Amenées de courant conductrices normales auto-refroidies

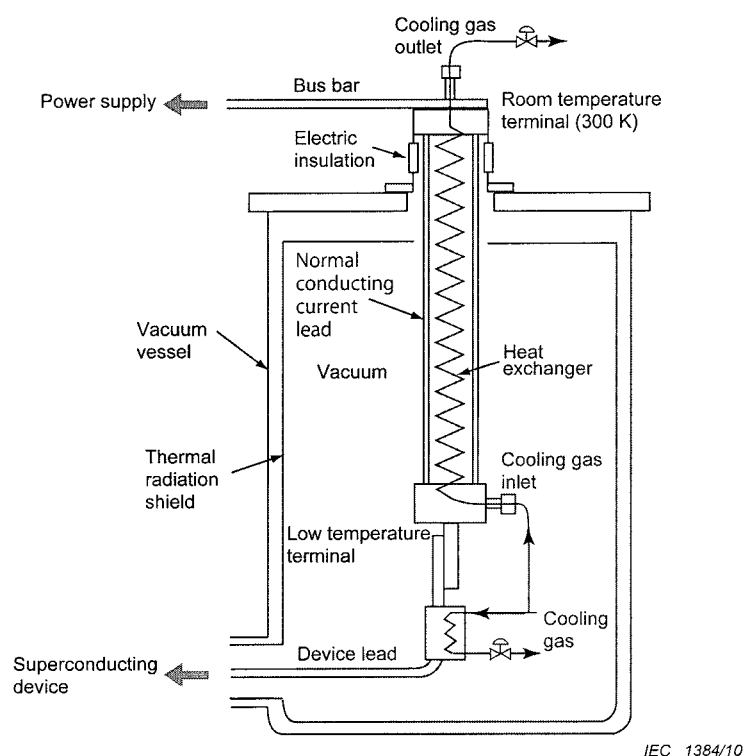


Légende

Anglais	Français
Cooling gas outlet	Sortie du gaz de refroidissement
Bus bar	Barre de bus
Power supply	Alimentation
Electric insulation	Isolation électrique
Room temperature terminal (300 K)	Borne à température ambiante (300 K)
Normal conducting current lead	Amenée de courant conductrice normale
Cryostat	Cryostat
Thermal insulation	Isolation thermique
Heat exchanger	Échangeur de chaleur
Cooling gas inlet	Entrée du gaz de refroidissement
Low temperature terminal	Borne à basse température
Evaporating He gas	Évaporation de gaz He
Device lead	Amenée de dispositif
Superconducting device	Dispositif supraconducteur

Figure B.1 – Dessin schématique d'amenées de courant conductrices normales auto-refroidies

B.2.2 Amenées de courant conductrices normales refroidies par écoulement forcé

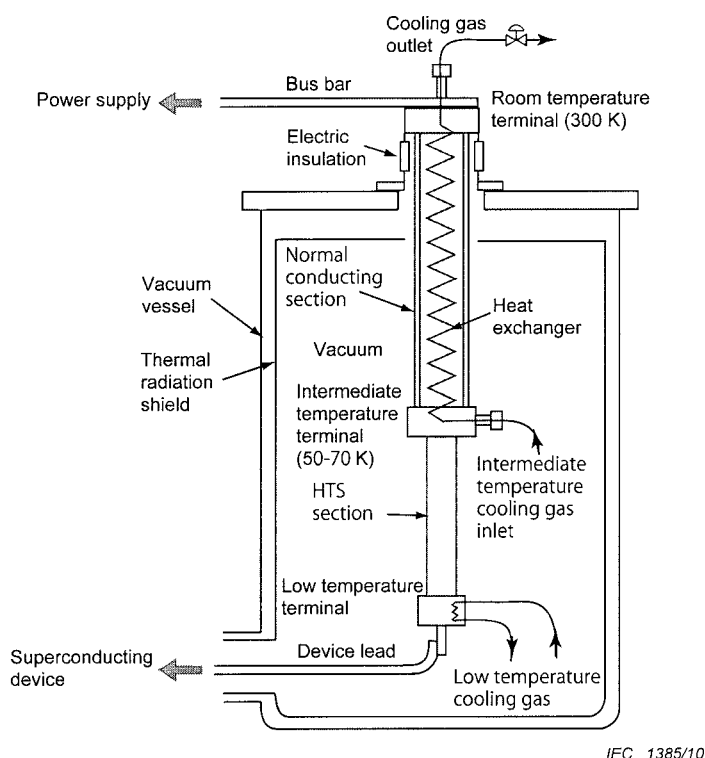


Légende

Anglais	Français
Cooling gas outlet	Sortie du gaz de refroidissement
Bus bar	Barre de bus
Power supply	Alimentation
Electric insulation	Isolation électrique
Room temperature terminal (300 K)	Borne à température ambiante (300 K)
Normal conducting current lead	Amenée de courant conductrice normale
Vacuum vessel	Réceptacle sous vide
Thermal radiation shield	Bouclier de rayonnement thermique
Vacuum	Vide
Heat exchanger	Échangeur de chaleur
Cooling gas inlet	Entrée du gaz de refroidissement
Low temperature terminal	Borne à basse température
Cooling gas	Gaz de refroidissement
Device lead	Amenée de dispositif
Superconducting device	Dispositif supraconducteur

Figure B.2 – Dessin schématique d'amenées de courant conductrices normales refroidies par écoulement forcé

B.2.3 Amenées de courant constituées d'une section conductrice normale refroidie par écoulement forcé et d'une section HTS dans un environnement sous vide

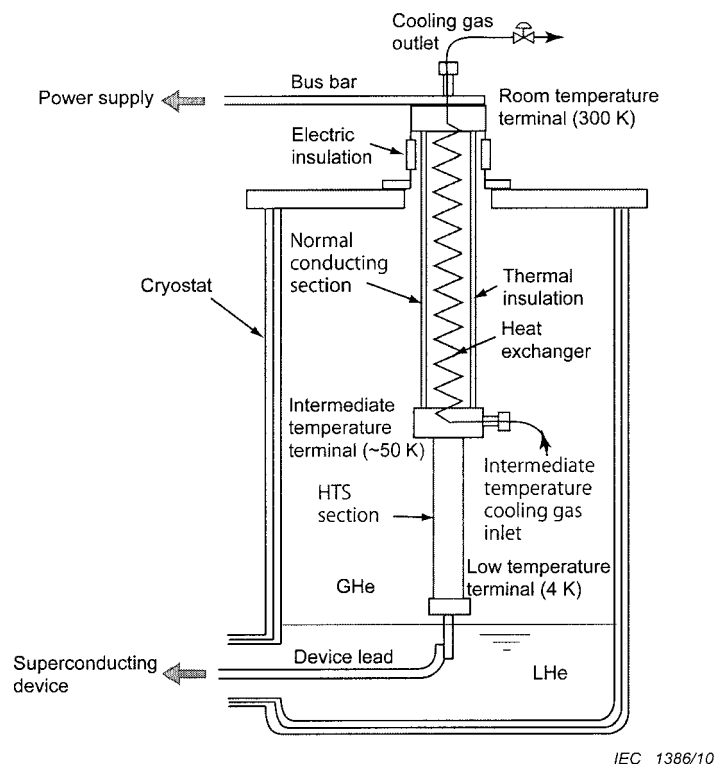


Légende

Anglais	Français
Cooling gas outlet	Sortie du gaz de refroidissement
Bus bar	Barre de bus
Power supply	Alimentation
Electric insulation	Isolation électrique
Room temperature terminal (300 K)	Borne à température ambiante (300 K)
Normal conducting section	Section de courant conductrice normale
Vacuum vessel	Réceptacle sous vide
Thermal radiation shield	Bouclier de rayonnement thermique
Vacuum	Vide
Heat exchanger	Échangeur de chaleur
Intermediate temperature terminal (50-70 K)	Borne à température intermédiaire (50 à 70 K)
HTS section	Section HTS
Intermediate temperature cooling gas inlet	Entrée du gaz de refroidissement à température intermédiaire
Low temperature terminal	Borne à basse température
Low temperature cooling gas	Gaz de refroidissement à basse température
Device lead	Amenée de dispositif
Superconducting device	Dispositif supraconducteur

Figure B.3 – Dessin schématique d'amenées de courant constituées d'une section conductrice normale refroidie par écoulement forcé et d'une section HTS dans un environnement sous vide

B.2.4 Amenées de courant constituées d'une section conductrice normale refroidie par écoulement forcé et d'une section HTS dans un environnement de GHe

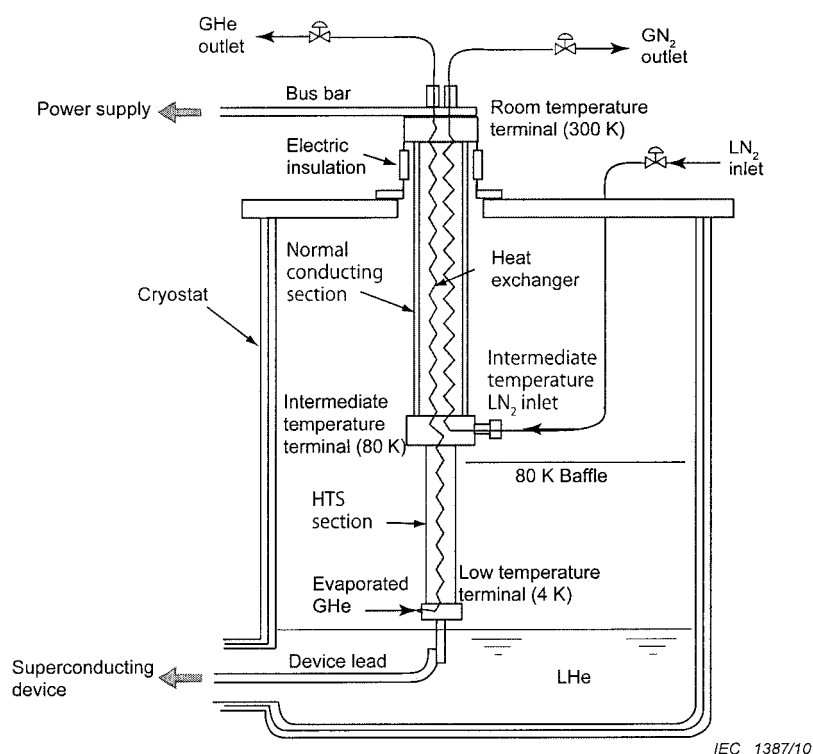


Légende

Anglais	Français
Cooling gas outlet	Sortie du gaz de refroidissement
Bus bar	Barre de bus
Power supply	Alimentation
Electric insulation	Isolation électrique
Room temperature terminal (300 K)	Borne à température ambiante (300 K)
Normal conducting section	Section de courant conductrice normale
Cryostat	Cryostat
Thermal insulation	Isolation thermique
Heat exchanger	Échangeur de chaleur
Intermediate temperature terminal (~50 K)	Borne à température intermédiaire (~50 K)
HTS section	Section HTS
Intermediate temperature cooling gas inlet	Entrée du gaz de refroidissement à température intermédiaire
Low temperature terminal (4 K)	Borne à basse température (4 K)
GHe	GHe
Device lead	Amenée de dispositif
Superconducting device	Dispositif supraconducteur

Figure B.4 – Dessin schématique d'amenées de courant constituées d'une section conductrice normale refroidie par écoulement forcé et d'une section HTS dans un environnement de GHe

B.2.5 Amenées de courant constituées d'une section conductrice normale refroidie par LN₂/GN₂/GHe et d'une section HTS refroidie par hélium évaporé autosuffisante



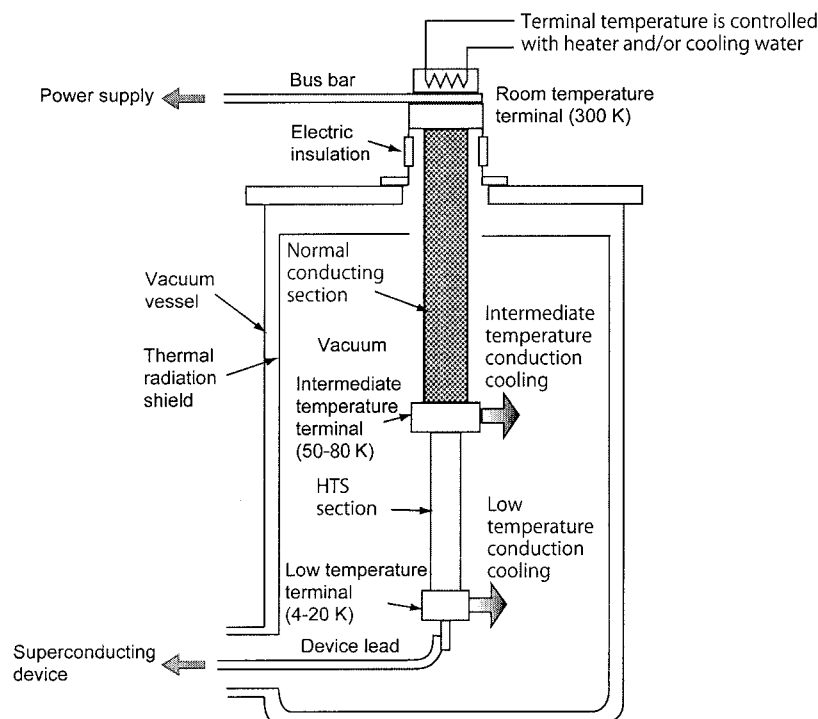
Légende

Anglais	Français
GHe outlet	Sortie du GHe
GN ₂ outlet	Sortie du GN ₂
Bus bar	Barre de bus
Power supply	Alimentation
Electric insulation	Isolation électrique
Room temperature terminal (300 K)	Borne à température ambiante (300 K)
LN ₂ inlet	Entrée LN ₂
Normal conducting section	Section de courant conductrice normale
Cryostat	Cryostat
Intermediate temperature LN ₂ inlet	Entrée LN ₂ à température intermédiaire
Heat exchanger	Échangeur de chaleur
Intermediate temperature terminal (80 K)	Borne à température intermédiaire (80 K)
HTS section	Section HTS
80 K baffle	Chicane 80 K
Low temperature terminal (4 K)	Borne à basse température (4 K)
Evaporated GHe	GHe évaporé
Device lead	Amenée de dispositif
LHe	LHe
Superconducting device	Dispositif supraconducteur

Figure B.5 – Dessin schématique d'amenées de courant constituées d'une section conductrice normale refroidie par LN₂/GN₂/GHe et d'une section HTS refroidie par hélium évaporé autosuffisante

B.3 Amenée de courant du type sans réfrigérant gazeux

B.3.1 Amenées de courant constituées d'une section conductrice normale refroidie par conduction et d'une section HTS



IEC 1388/10

Légende

Anglais	Français
Terminal temperature is controlled with heater and/or cooling water	La température de la borne est régulée par un élément chauffant et/ou de l'eau de refroidissement
Bus bar	Barre de bus
Power supply	Alimentation
Electric insulation	Isolation électrique
Room temperature terminal (300 K)	Borne à température ambiante (300 K)
Vacuum vessel	Réceptacle sous vide
Normal conducting section	Section de courant conductrice normale
Thermal radiation shield	Bouclier de rayonnement thermique
Vacuum	Vide
Intermediate temperature terminal (50-80 K)	Borne à température intermédiaire (50 à 80 K)
Intermediate temperature conduction cooling	Refroidissement par conduction à température intermédiaire
HTS section	Section HTS
Low temperature terminal (4-20 K)	Borne à basse température (4 à 20 K)
Low temperature conduction cooling	Refroidissement par conduction à basse température
Device lead	Amenée de dispositif
Superconducting device	Dispositif supraconducteur

Figure B.6 – Dessin schématique d'amenées de courant constituées d'une section conductrice normale refroidie par conduction et d'une section HTS

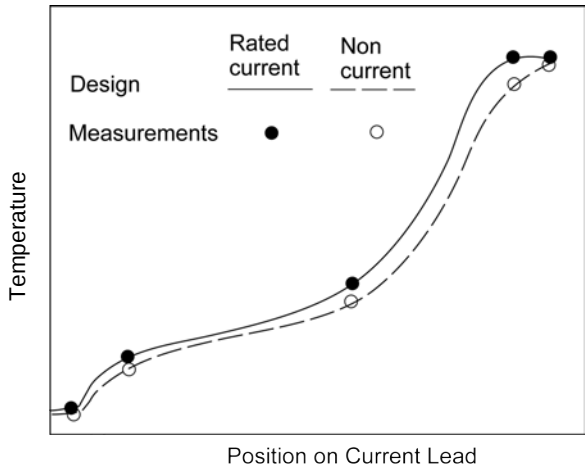
Annexe C
(informative)

**Figures explicatives destinées à faciliter
la compréhension des méthodes d'essai**

C.1 Généralités

Les figures de cette annexe sont fournies pour faciliter la compréhension des méthodes d'essai. Pour expliquer les méthodes d'essai, on considère un profil de température pendant l'essai de courant limite assigné, la dépendance de la tension de claquage par rapport à la pression dans l'essai d'étanchéité de Paschen et la dépendance de l'augmentation de tension par rapport au temps dans l'essai de quench des amenées de courant HTS.

C.2 Profil de température pendant l'essai de courant limite assigné



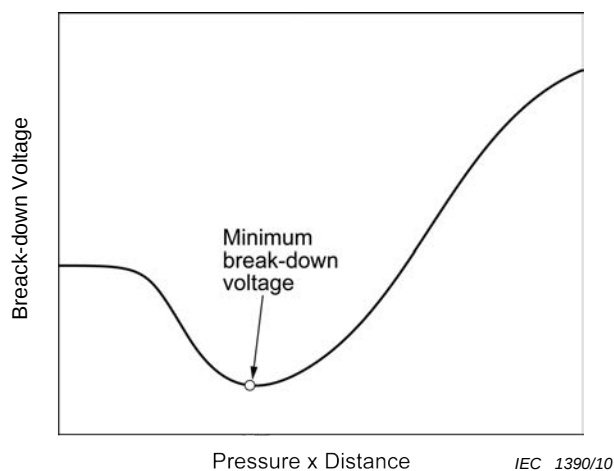
IEC 1389/10

Légende

Anglais	Français
Design measurements	Mesures par conception
Rated current	Courant assigné
Non current	Pas de courant
Temperature	Température
Position on Current Lead	Position sur l'amenée de courant

**Figure C.1 – Dessin schématique d'un profil de température
pendant l'essai de courant limite assigné**

C.3 Dépendance de la tension de claquage par rapport à la pression dans l'essai d'étanchéité de Paschen

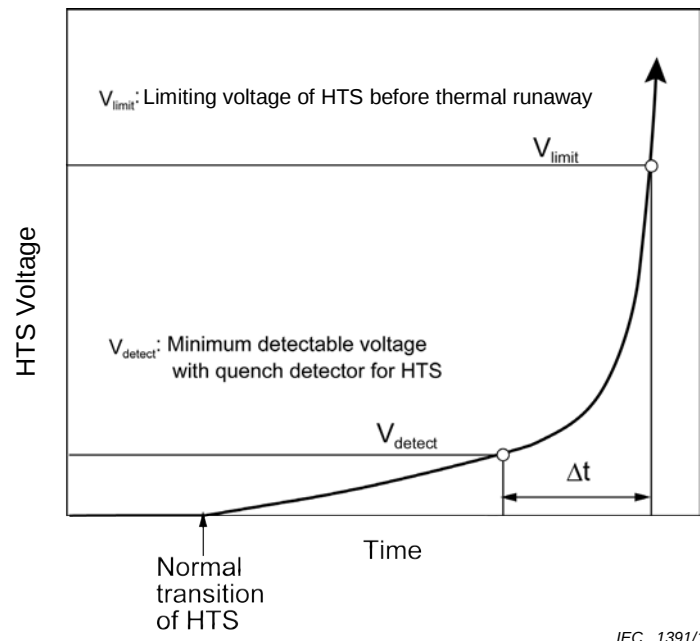


Légende

Anglais	Français
Break-down voltage	Tension de claquage
Minimum break-down voltage	Tension de claquage minimale
Pressure x Distance	Pression x Distance

Figure C.2 – Dessin schématique de la dépendance de la tension de claquage par rapport à la pression dans l'essai d'étanchéité de Paschen

C.4 Dépendance de l'augmentation de tension par rapport au temps dans l'essai de quench



NOTE Δt signifie la différence de temps due à une augmentation de tension de V_{detect} à V_{limit} , et correspond à la marge de sécurité des amenées de courant comme mentionné en 6.10.2.

Légende

Anglais	Français
V_{limit} : Limiting voltage of HTS before thermal runaway	V_{limit} : Tension de limitation de HTS avant excursion thermique
V_{detect} : Minimum detectable voltage with quench detector for HTS	V_{detect} : Tension minimale détectable avec détecteur de quench pour HTS
HTS voltage	Tension de HTS
Normal transition of HTS	Transition normale de HTS
Time	Temps

Figure C.3 – Dessin schématique de la dépendance de l'augmentation de tension par rapport au temps dans l'essai de quench

Annexe D (informative)

Éléments et méthodes d'essai pour un composant HTS

D.1 Domaine d'application

La présente norme décrit la caractéristique commune des éléments et méthodes d'essai pour l'amenée de courant complète. On suppose toutefois que pour une application des amenées de courant HTS, certains fabricants ne réalisent qu'un seul composant de la section HTS pour l'amenée de courant et d'autres fabricants ou utilisateurs les assemblent pour former l'amenée de courant complète. Il convient de noter particulièrement dans les points ici énumérés les éléments et les méthodes d'essai d'un composant HTS, ce qui constitue la partie la plus importante de l'amenée de courant supraconductrice.

D.2 Éléments des essais de caractéristiques pour un composant HTS

Il convient que les éléments des essais de caractéristiques pour un composant HTS représentés dans le Tableau D.1 permettent à l'utilisateur de vérifier si le composant HTS satisfait aux exigences spécifiées pour la section HTS de l'amenée de courant et d'estimer si les éléments des essais satisfont à l'étape d'exécution de l'amenée de courant supraconductrice.

Tableau D.1 – Éléments des essais de caractéristiques pour un composant HTS

	Catégorie des essais de caractéristiques	Éléments des essais	Étape d'exécution des essais de caractéristiques		
			R&D ^a	Catalogue ^b	Réception ^c
1	Caractéristiques mécaniques	Inspection de structure (6.1)		Oui	Oui
		Essai d'effet de contraintes/déformations (D.4.1)	Oui		
2	Propriétés thermiques	Essai de fuites thermiques sans courant (6.3.1)	Oui		
3	Caractéristiques électriques	Essai de courant limite assigné (6.4)	Oui	Oui	
4	Caractéristiques de marge de sécurité	Essai de quench (6.10.2)	Oui		
^a « R&D » signifie l'étape d'essai pour les recherches de base ou les fabrications d'essai du composant HTS. ^b « Catalogue » signifie l'étape d'essai pour fabrication R&D ou en grande quantité des composants HTS. ^c « Réception » signifie l'étape d'essai des fabricants et concepteurs des systèmes d'amenées de courant.					

D.3 Méthodes d'essai générales

Chaque méthode d'essai de caractéristique peut être applicable en se référant à l'Article 6 de la norme principale. Un état de refroidissement, une isolation électrique, un support mécanique, etc., peuvent être simplifiés s'ils sont équivalents à l'état dans lequel un composant HTS est utilisé en tant que section supraconductrice de l'amenée de courant.

D.4 Méthodes d'essai simplifiées

D.4.1 Objectif – Essai d'effet de contraintes/déformations

Cet essai doit confirmer l'effet de contraintes/déformations mécaniques et thermiques du composant HTS à la température ambiante et aux basses températures.

D.4.2 Méthodes

Un niveau de contraintes/déformations mécaniques à la température ambiante et aux basses températures dans le composant HTS doit être simulé et on augmente la contrainte/déformation mécanique jusqu'au niveau maximal précédant la limite élastique du supraconducteur.

NOTE 1 Il convient de définir la charge maximale en fonction de la marge de sécurité et celle-ci est généralement égale à 1,1 fois le niveau de spécification.

NOTE 2 Il convient de répéter l'essai, un certain nombre de fois, en distinguant l'état entre une charge électromagnétique et une charge calorifique.

NOTE 3 Dans le cas du composant HTS utilisant les supraconducteurs de système de Bi enveloppé d'un alliage d'Ag, les propriétés électriques ont été garanties pratiquement après répétition de l'essai de traction à la température ambiante et jusqu'à 1,1 fois la limite d'élasticité, qui est définie par les contraintes/déformations d'épreuve suffisamment abaissées à 0,2 % des supraconducteurs sur les données expérimentales ou les règles locales appropriées.

D.4.3 Résultats

Les résultats des essais doivent être regroupés avec les spécifications et entièrement consignés.

Bibliographie

- [1] WILSON, MN., *Superconducting Magnets*. Oxford University Press, Oxford, 1983, pp. 256-272.
 - [2] LOCK, JM., *Cryogenics*, 1969, vol.9 pp. 438-442.
 - [3] BALLARINO, A., Current Leads for the LHC Magnet System. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2002, vol. 12 pp. 1275-1280.
 - [4] BALLARINO, A., HTS current leads for the LHC magnet powering system. *Physica C*, 2002, 372-376 pp. 1413-1418.
 - [5] IEC 61788-3:2006, *Superconductivity – Part 3: Critical current measurement – DC critical current of Ag- and/or Ag alloy-sheathed Bi-2212 and Bi-2223 oxide superconductors (disponible en anglais uniquement)*
 - [6] CEI 61788-10:2006, *Supraconductivité – Partie 10: Mesure de la température critique – Température critique des composites supraconducteurs par une méthode par résistance*
-

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch