

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Nuclear power plants – Instrumentation important to safety – Temperature sensors (in-core and primary coolant circuit) – Characteristics and test methods

Centrales nucléaires de puissance – Instrumentation importante pour la sûreté – Capteurs de température (dans le cœur et le circuit primaire) – Caractéristiques et méthodes d'essai



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2010 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: 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.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch
Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch
Tél.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Nuclear power plants – Instrumentation important to safety – Temperature sensors (in-core and primary coolant circuit) – Characteristics and test methods

Centrales nucléaires de puissance – Instrumentation importante pour la sûreté – Capteurs de température (dans le cœur et le circuit primaire) – Caractéristiques et méthodes d'essai

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

U

ICS 27.120.20

ISBN 978-2-88912-020-8

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms and definitions	9
4 General considerations.....	11
4.1 Requirements for temperature measurements	11
4.2 Safety applications	12
4.3 Nuclear conditions.....	12
5 Temperature sensors.....	12
5.1 Resistance temperature detector.....	12
5.2 Thermocouple	14
5.3 Other temperature sensors.....	15
5.4 Comparison between RTD and thermocouples	15
6 Characteristics of a temperature sensor	16
6.1 General.....	16
6.2 Installation	16
6.2.1 Thermowell.....	16
6.2.2 Cables.....	16
6.3 Functional characteristics.....	16
6.3.1 Sensitivity.....	16
6.3.2 Response time	16
6.3.3 Linearity	17
6.4 Accuracy in temperature measurements.....	17
6.5 Mechanical characteristics	17
7 Temperature measurement system design	18
7.1 General requirements.....	18
7.1.1 General	18
7.1.2 Environmental conditions.....	19
7.1.3 Classification.....	19
7.1.4 Performance.....	19
7.2 Site implementation.....	19
7.2.1 Environmental conditions and operation	19
7.2.2 Operating mode.....	20
7.2.3 Calibration.....	20
7.2.4 Measuring range and accuracy.....	21
7.2.5 Electrical conditions.....	21
8 Requirements for tests	22
8.1 General.....	22
8.2 Pre-production testing	22
8.3 Production processes and testing.....	22
8.3.1 General	22
8.3.2 Factors for sheathed thermocouples	23
8.3.3 Factors for RTD.....	23
8.4 Tests on site	23
9 Qualification tests.....	23

9.1	Principles	23
9.2	Test sequence on a sensor	24
9.3	Test for environmental conditions	24
9.3.1	Temperature test	24
9.3.2	Pressure test	24
9.3.3	Other tests	24
9.4	Seismic tests	24
	Bibliography	25
	Table 1 – RTD and thermocouple characteristic comparison	15

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

NUCLEAR POWER PLANTS – INSTRUMENTATION IMPORTANT TO SAFETY – TEMPERATURE SENSORS (IN-CORE AND PRIMARY COOLANT CIRCUIT) – CHARACTERISTICS AND TEST METHODS

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 60737 has been prepared by subcommittee 45A: Instrumentation and control of nuclear facilities, of IEC technical committee 45: Nuclear instrumentation.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1982. This edition constitutes a technical revision.

The main changes with respect to the previous edition are listed below:

- to up-date the references to standards published or revised since the issue of the first edition of the current standard, including IEC 61513 and IEC 61226;
- to include descriptions of the comparative performance of thermocouples and resistance temperature detectors;
- to include a discussion of the temperature measuring system requirements for reactors;
- to adapt the definitions;

- to update the format to align with the current ISO/IEC Directives on style of standards.

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

FDIS	Report on voting
45A/800/FDIS	45A/806/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.

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

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

a) Technical background, main issues and organisation of the Standard

This International Standard addresses the issues specific to temperature detectors used mainly for in-core and primary coolant circuit instrumentation systems. It describes the principles, the characteristics and the test methods for temperature detectors including: RTDs and thermocouples.

It is organized into clauses giving:

- the definitions;
- description of the different types of temperature sensors;
- system design;
- analysis of the factors of influence;
- the operational conditions for sensors;
- the factory tests;
- the qualification tests.

It is intended that the Standard be used by operators of NPPs (utilities), nuclear plant designers and constructors, systems evaluators and by licensors.

b) Situation of the current Standard in the structure of the IEC SC 45A standard series

IEC 60737 is the third level IEC SC 45A document tackling the specific issue of characteristics and test methods related to temperature detectors used in power reactors.

For more details on the structure of the IEC SC 45A standard series, see the paragraph d) of this introduction.

c) Recommendations and limitations regarding the application of the Standard

There are no special recommendations or limitations regarding the application of this standard.

d) Description of the structure of the IEC SC 45A standard series and relationships with other IEC documents and other bodies documents (IAEA, ISO)

The top-level document of the IEC SC 45A standard series is IEC 61513. It provides general requirements for I&C systems and equipment that are used to perform functions important to safety in NPPs. IEC 61513 structures the IEC SC 45A standard series.

IEC 61513 refers directly to other IEC SC 45A standards for general topics related to categorization of functions and classification of systems, qualification, separation of systems, defence against common cause failure, software aspects of computer-based systems, hardware aspects of computer-based systems, and control room design. The standards referenced directly at this second level should be considered together with IEC 61513 as a consistent document set.

At a third level, IEC SC 45A standards not directly referenced by IEC 61513 are standards related to specific equipment, technical methods, or specific activities. Usually these documents, which make reference to second-level documents for general topics, can be used on their own.

A fourth level extending the IEC SC 45A standard series, corresponds to the Technical Reports which are not normative.

IEC 61513 has adopted a presentation format similar to the basic safety publication IEC 61508 with an overall safety life-cycle framework and a system life-cycle framework and provides an interpretation of the general requirements of IEC 61508-1, IEC 61508-2 and IEC 61508-4, for the nuclear application sector. Compliance with IEC 61513 will facilitate consistency with the requirements of IEC 61508 as they have been interpreted for the nuclear industry. In this framework IEC 60880 and IEC 62138 correspond to IEC 61508-3 for the nuclear application sector.

IEC 61513 refers to ISO as well as to IAEA GS-R-3 for topics related to quality assurance (QA).

The IEC SC 45A standards series consistently implements and details the principles and basic safety aspects provided in the IAEA code on the safety of NPPs and in the IAEA safety series, in particular the Requirements NS-R-1, establishing safety requirements related to the design of Nuclear Power Plants, and the Safety Guide NS-G-1.3 dealing with instrumentation and control systems important to safety in Nuclear Power Plants. The terminology and definitions used by SC 45A standards are consistent with those used by the IAEA.

NUCLEAR POWER PLANTS – INSTRUMENTATION IMPORTANT TO SAFETY – TEMPERATURE SENSORS (IN-CORE AND PRIMARY COOLANT CIRCUIT) – CHARACTERISTICS AND TEST METHODS

1 Scope

This International Standard is applicable to general aspects of system and component design, manufacturing and test methods for temperature sensors used in-core and for the primary coolant circuit in nuclear power reactors.

These sensors include thermocouples and RTDs (Resistance Temperature Detector–RTD). Emphasis is placed on the features specific to the nuclear application and recommendations concerning components and sensors are made only when they relate to the containment of such components within the reactor primary envelope and/or in high radiation fields.

The conditions imposed by reactor use are often different from those which occur in non-nuclear applications. Parts of the in-core system may be located in very severe environments.

Exposure to high neutron and gamma radiations is liable to cause error due to nuclear transformations, heating and structural changes, and to affect the mechanical and electrical properties of the equipment so that extra care has to be taken in the standards adopted for installations and in the choice of materials.

Furthermore, design consideration needs to be given to the effects of high environmental pressure, high temperature, temperature gradients and temperature cycling as well as to the way in which the temperature measuring system could influence the safety or economic performance of the reactor.

The consequences of nuclear conditions for temperature sensors lead to strong requirements regarding qualification.

This standard deals with specific requirements for nuclear applications of temperature sensors. It has two purposes:

- a) to provide a guide which will help to ensure that the reactor conditions do not damage the temperature sensors;
- b) to ensure that the in-core temperature measuring system and the sensor installation do not prejudice the safe operation and the availability of the reactor.

Statements of general applicability are made but detailed consideration is restricted to thermocouples and RTDs.

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 60584-1, *Thermocouples – Part 1: Reference tables*

IEC 60584-2, *Thermocouples – Part 2: Tolerances*

IEC 60584-3, *Thermocouples – Part 3: Extension and compensating cables – Tolerances and identification system*

IEC 60709, *Nuclear power plants – Instrumentation and control systems important to safety – Separation*

IEC 60751, *Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*

IEC 60780, *Nuclear power plants – Electrical equipment of the safety system – Qualification*

IEC 60980, *Recommended practices for seismic qualification of electrical equipment of the safety system for nuclear generating stations*

IEC 61226, *Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Classification of instrumentation and control functions*

IEC 61513, *Nuclear power plants – Instrumentation and control for systems important to safety – General requirements for systems*

IEC 61515, *Mineral insulated thermocouple cables and thermocouples*

IEC 62342, *Nuclear power plants – Instrumentation and control systems important to safety – Management of ageing*

IEC 62385, *Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Methods for assessing the performance of safety system instrument channels*

IEC 62397, *Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Resistance temperature detectors*

IEC 62460, *Temperature – Electromotive force (EMF) tables for pure-element thermocouple combinations*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IAEA Safety Glossary edition 2007, IEC 60050-393 and IEC 60050-394 apply as well as the following:

3.1

accuracy of measurement

closeness of the agreement between the result of a measurement and the conventionally true value of the measurand

[IEV 394-40-35]

NOTE 1 “Accuracy” is a qualitative concept.

NOTE 2 The term “precision” should not be used for “accuracy”.

3.2

electrical shunting

effect of the shunting of the source impedance of the sensing device by the input impedance of the measuring device and the earth leakage impedance of the sensor

3.3

post-accident temperature sensor

temperature sensor designed to withstand and measure very high temperatures, which may be above 1 100 °C, that can occur if the fuel elements are not sufficiently cooled

3.4

resistance temperature detector (RTD)

detector generally made up of a stainless steel cylindrical barrel protecting a platinum resistor whose resistance varies with temperature. This detector is placed in the piping containing the fluid whose temperature is measured in this way. It can be directly immersed in the fluid or protected by an intermediate casing called the thermowell

NOTE 1 Mounting means or connection heads may be included. The temperature-sensing resistor can be made of platinum, nickel tungsten, copper, or other metals. However, a platinum sensor is commonly used in the RTD in an NPP; therefore, a platinum resistance thermometer is referred to in this standard.

NOTE 2 In this standard, the term “sensor” describes the RTD unit with all its associated protection, for example, barrel or thermowell. For most applications of measuring process fluid temperature in an NPP, the platinum resistor sensor is installed inside a stainless steel thermowell. For air temperature measurement, a direct sensor may be used.

[IEC 62397, 3.5]

3.5

sensitivity

for a given value of the measured quantity, ratio of the variation of the observed variable to the corresponding variation of the measured quantity

[IEV 394-39-07, modified]

3.6

service life

the period from initial operation to final withdrawal from service of a structure, system or component

[IAEA Safety Glossary, edition 2007]

NOTE The service life for a sensor corresponds to the operational life under irradiation and environmental conditions restricted within specified limits, after which the sensor characteristics exceed specified tolerances. It can be expressed in terms of incident particle fluence, time of operation, etc.

3.7

sheathed thermocouple

thermocouple embedded in a mineral insulation within a gas-tight, metal protecting tube as a sheath, with the two leads brought out for measurement through a moisture-proof seal

3.8

temperature measuring sensor

device, fixed or movable, designed to provide a signal for the measurement of temperature at a defined point in the core of the reactor or on the primary coolant circuit

NOTE Examples are Resistance Temperature Detectors and thermocouples such as sheathed thermocouples, insulated junction thermocouples and non-insulated junction thermocouples.

3.9

temperature measuring system

system, using in-core temperature measuring sensors, designed for the measurement of primary coolant, fuel, moderator and reactor structure temperatures

NOTE This system may be either independent of or a part of the general in-core monitoring system which provides the information necessary for normal reactor operation. A temperature measurement system includes all the components necessary to produce information or a signal representing the temperature at the sensor location. The components are: the temperature sensor itself, the thermowell, the cables, the connectors, the electronic system.

3.10 thermocouple

temperature measuring device based on the use of two conductors of different metals welded together at their two ends to form two junctions

NOTE One junction is at the temperature site of interest, the other at a reference stable cold temperature. The signal of a thermocouple arises from the Seebeck effect which generates a voltage that varies with the temperature difference between the junctions.

3.11 thermowell

protective jacket for RTDs, thermocouples, and other temperature sensors. The thermowell is also used to facilitate replacement of the temperature sensor

[IEC 62385, 3.19]

4 General considerations

4.1 Requirements for temperature measurements

Temperature is a fundamental parameter related to the nuclear process in a reactor. It can be measured with specific sensors to perform the following main safety functions:

- to monitor the temperature of the cooling system and to follow the operating conditions with regard to the design parameters;
- to measure the thermal power of the reactor when the temperature measurement is combined with the coolant flow rate measurement;
- to monitor the temperature of the fuel elements in order to avoid a boiling incident or melting of the fuel element itself.

Temperature measurements are required from the fuel, moderator, coolant or structural members supporting the core. They are used for control purposes, for the protection system, for shut-down and accident monitoring or for the provision of more general information about the reactor or its components.

In a power reactor with a core which has large physical dimensions, it may be important to monitor not only mean temperatures but also spatial temperature distributions. Measurements at particular positions may be used for the control of specific parts of the reactor core to ensure adequate safety margins for protection system parameters or to provide for optimum fuel utilization.

Some in-core measurements may also be necessary for reasons such as protecting the fuel from damage caused by local disturbances in coolant flow or by transients in local power density. In most cases, temperature sensors are used to measure temperature directly, but applications do arise in which information is derived from fluctuations in temperature. An example of the latter is the derivation of coolant flow by correlation of the fluctuations obtained from a spaced pair of sensors.

The measurement of in-core temperature for water reactors is important for reactor efficiency and fuel burn up, and may be achieved through probes inserted into specific channels of the reactor, or by permanently installed detectors. The measurements of these sensors are normally taken at routine intervals, followed by calculations to assess the conditions at each monitored fuel channel.

In all these applications, the environment is demanding and the performance of the temperature measurement system is either important to safety or to operation.

The temperature signals may be measured in a continuous or discontinuous manner depending on the application. This will not usually affect the design of the in-core installation.

4.2 Safety applications

Temperature sensors used in a system performing safety functions classified according to IEC 61226 shall follow the associated safety requirements determined by the safety class of the functions. If the measurements are important to safety, the cable routes shall also satisfy separation requirements to meet relevant single failure criteria and to avoid common cause failures, see IEC 60709.

After an accident, the cooling of fuel elements may decrease and the temperature inside the fuel may increase dramatically. A fuel element melt may occur and, when the coolant is water, a chemical reaction between the cladding and water produces a large quantity of hydrogen. The post accident conditions should be monitored by using temperature measurements capable of withstanding very high temperatures (for example, higher than 1 100 °C for light water reactors). The maximum temperature to be measured and the locations of the temperature sensors shall be specified by the designer of the reactor.

4.3 Nuclear conditions

The nuclear conditions related to the coolant circuit or inside the reactor vessel are very specific and different from general industry conditions. These conditions are characterized by the following:

- High radiation dose rates induced by gamma and neutrons, noting that:
 - high gamma dose rates damage organic materials by changing the molecular links;
 - fast neutrons damage organic and mineral materials by changing the atomic structure. This phenomenon can cause a change in characteristics;
 - thermal neutrons induce activation.
- Because the sensors are usually not easily accessible, they shall have a very high reliability, and the electronic components should be located far away from the radioactive zone.
- A reactor operates continuously with harsh conditions for a long time.

A temperature sensor specific for nuclear applications differs from normal industrial sensors by the following:

- qualification to normal conditions and nuclear conditions;
- quality assurance in accordance with nuclear standards, depending on the requirements.

5 Temperature sensors

5.1 Resistance temperature detector

A resistance temperature detector (RTD) is a temperature sensor whose resistance increases with temperature. An RTD consists of a wired coil or deposited film of pure metal. RTDs can be made of different metals (Pt, Cu, Ni..) and have different resistances, but the most common RTD is platinum and has a nominal resistance of 100 Ω at 0 °C. For nuclear applications on water cooled reactors the use of only one type of RTD gives better consistency of the measurement and easier maintenance.

The following two standards give some clarification on RTDs:

- IEC 60751:2008;
- IEC 62397:2007.

The relationship between the resistance and the temperature is given by the Callendar-Van Dusen formula:

$$R = R_0(1 + AT + BT^2)$$

where

T = is the temperature in °C – in the range 0 °C to 1300 °C;

R = is the resistance (Ω) at temperature T ;

R_0 = is the resistance at 0 °C (reference);

A and B are coefficients.

The coefficient B is relatively small (about $6 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$) so that the resistance varies almost linearly with temperature, and it is taken to be linear for the rest of this standard.

RTDs can be difficult to measure because they have a relatively low resistance that changes only slightly with temperature (less than $0,4 \text{ } \Omega/^\circ\text{C}$). To measure these small changes in resistance accurately, special connection configurations should be used that minimize errors from lead wire resistance.

Typically, an RTD can be used with three different wiring configurations: 2, 3 or 4 wires. The wiring configuration has a direct impact on accuracy. The 4 wires configuration offers the best accuracy.

The sensitive element of an RTD is a metallic wire or a metallic coating on an insulating material. Due to the principle of measurement, the sensitive element shall be protected in a sheath filled with a mineral insulating material.

Because an RTD is a passive resistive device, a current has to be passed through the sensitive element to produce a measurable voltage. This current causes the RTD to internally heat, which appears as an error. Self heating is typically specified as the amount of power that will raise the RTD temperature by 1 °C, usually expressed in $\text{mW}/^\circ\text{C}$.

The self heating can be minimized by using the smallest possible excitation current. The amount of self heating also depends on the medium in which the RTD is immersed.

RTDs are constructed in a number of forms and offer greater stability, accuracy and repeatability in some cases than thermocouples.

RTDs have a resistance varying linearly with temperature. They are characterized by

- an excellent accuracy;
- a wide range of operation, up to 600 °C;
- a low drift.

IEC 60751 defines two performance classes for RTDs, Class A and Class B. These performance classes define tolerances on ice point and temperature accuracy.

- Class A: highest RTD element tolerance and accuracy;
- Class B: most common RTD element tolerance and accuracy.

RTDs require the same precautions that apply to thermocouples, including using shields and twisted-pair wire, proper sheathing, avoiding mechanical stress and steep temperature gradients, and using large diameter extension wire.

A measurement problem with RTDs is that the mass of the RTD assembly itself can affect the response to temperature changes, due to the thermal conduction time. This is a greater concern for RTDs than for thermocouples because the mass of the RTD is generally much larger. This phenomenon is known as “thermal shunting”, it affects the temperature measurement by thermal conduction, and more specifically by thermal conduction inside the sensor itself.

RTDs are preferably used for temperature below 400 °C.

5.2 Thermocouple

Thermocouples are temperature sensitive elements that convert thermal difference into electric voltage.

The principle is that two dissimilar metals have a contact potential between them, and this contact potential changes as the temperature changes. Thermocouples measure the temperature difference between two points, and not absolute temperature. In typical applications, one of the junctions - the cold junction - is maintained at a known reference temperature, while the other end is attached to a probe.

IEC 60584, IEC 61515 and IEC 62460 give general requirements for thermocouple application.

Thermocouple temperature measurement systems use an artificial cold junction whose temperature is measured using some other thermally sensitive device, such as a thermistor or a diode. The voltage from a known cold junction allows the appropriate correction to be applied. This is known as cold junction compensation.

In practice, however, only a few thermocouple types have become standard because their temperature coefficients are highly repeatable, they are rugged, and they generate relatively large output voltages. The most common industrial thermocouple types are called J, K, N, R, T, S, B, E. The junction temperature differences can be deduced from the voltage differences and the corresponding values can be obtained from standard tables (IEC 60584 series). For nuclear applications on water cooled reactors, types K and N are preferred. The use of one type of thermocouple gives better consistency of the measurement and easier maintenance.

Thermocouples are generally divided into two groups:

- noble metal thermocouple types S, R, B. These thermocouples can be used for operating temperatures up to 1 700 °C;
- base metal thermocouple types E, J, K, N, T. These thermocouples can be used for operating temperatures below 1 100 °C, the range of temperature of each type is specific.

The sensitive element of a thermocouple is the junction between two different metallic wires. It is possible to fix the junction directly on the body of the object of which the temperature is measured, but it is better to protect the wires in a sheath. The sheath is a thin metallic tube filled with a mineral insulating material.

The sensitive junction can be either:

- fixed on the metallic tube, for a non-insulated sheathed thermocouple; or,
- isolated from the metallic tube, for an insulated sheathed thermocouple

For temperature measurement on the primary circuit, insulated types are recommended because they tend to be less susceptible to reduction in accuracy and to spurious signals produced by fault conditions and to electromagnetic disturbances.

Thermocouples can measure a wide range of temperatures, up to 1 700 °C. Their main limitation is accuracy.

The IEC 60584 series address the general requirements for thermocouples and their cables.

5.3 Other temperature sensors

Other sensors to measure temperature exist, as examples:

- bi-metallic strips convert a temperature change into mechanical displacement;
- optical fibers can be used as sensors to measure temperature by modulating the characteristics of light in the fiber;
- thermistors are similar to RTDs in that they also change resistance with a change in temperature. However, they can be made with either a positive or negative temperature coefficient. The main characteristics of a thermistor are a good sensitivity but a limited range of operation, non compatible with nuclear conditions.

In practice, these sensors are not used in a NPP nuclear environment, they are not considered in this standard.

5.4 Comparison between RTD and thermocouples

This subclause gives a comparison between characteristics of RTD and thermocouples in order to help the selection for nuclear applications.

Table 1 – RTD and thermocouple characteristic comparison

Characteristic	RTD	Thermocouple
Range of operation	0 °C to 600 °C recommended below 400 °C	0 °C to 1 100 °C (base metal) 0 °C to 1 700 °C (noble metal)
Accuracy	Excellent	Medium
Stability	Excellent	Fair
Repeatability	Excellent	Good
Linearity	Good	Fair
Response time	Slow	Medium to fast
Sensitivity	Good	Low
Self heating	Low	None
Cabling	Three or four wires configuration	Two wires Extension and compensation cable are specific
Compensation	Not required	Cold junction

In nuclear conditions, RTDs have better characteristics than thermocouples, except the range of temperature which is wider with thermocouples than RTDs.

For fuel element temperature measurement or post-accident temperature monitoring, thermocouples are preferred.

6 Characteristics of a temperature sensor

6.1 General

This clause considers only the characteristics which are important to the in-core application of temperature sensors. The sensors under consideration may be either sheathed thermocouples or RTDs.

The selection of a type of temperature sensor shall be made according to its characteristics compared with the conditions of operation and requirements. To select a type of temperature sensor for a particular temperature range consult the basic standards:

- IEC 60751 for RTD;
- IEC 60584 series for thermocouples.

6.2 Installation

6.2.1 Thermowell

A temperature sensor, RTD or thermocouple can be used either in direct contact with the material of which the temperature is measured or inside a thermowell to be protected from the environmental conditions.

Generally, for nuclear applications the temperature sensors are installed inside a thermowell for mechanical protection. The consequences are:

- a higher thermal inertia giving a longer response time;
- possible measurement errors due to poor thermal contact between the sensor and the thermowell. To avoid this risk, good contact is often assured by a spring.

The characteristics of a sensor shall be defined with its thermowell.

6.2.2 Cables

The cables and their routes are of importance. The parameters to be considered for cables depend on the temperature sensor.

For nuclear applications, the insulating material of cables shall be mineral to withstand the environmental conditions.

For measurement on the primary circuit, cable routes shall be designed to avoid EMI.

6.3 Functional characteristics

6.3.1 Sensitivity

The sensitivity of a temperature sensor is given by the physical behaviour of its materials according to the temperature change. The sensitivity is given by standards for each type of sensor.

6.3.2 Response time

For nuclear applications the response time may be crucial.

The response time of the sensor (definition and value) shall be specified and shall be acceptable for the proposed application.

One factor determining response time is the product of the thermal capacity of the sensor and the rate at which heat can flow into it from the environment.

Response time, reliability and accuracy should be considered together, for example: response time of thermocouples can be shortened by reducing the diameter of the hot junction assembly but this could adversely affect reliability.

Depending on the functional requirements, three kinds of sensors are considered according to their response time:

- fast sensors (response time typically less than 1 s);
- semi-fast sensors (response time between 1 s and 5 s);
- slow sensors (response time typically longer than 5 s).

6.3.3 Linearity

The response of the sensing element of a temperature sensor is given by tables in the standards. An RTD is nearly linear, but a thermocouple is non linear and needs a specific conversion made by an electronic system in order to achieve a linear relationship between the signal and the temperature.

6.4 Accuracy in temperature measurements

The required accuracy shall be assessed, taking into account the perturbation caused by the measuring instrument. The difference between uncertainty of absolute temperature measurements and measurements of temperature differences shall be distinguished.

The consequences of deterioration including decrease of insulation resistance shall be allowed for. This may be done by the provision of in situ calibration facilities but is more usually achieved by close attention to the factors which can cause loss of accuracy.

These factors are:

- damage to the sensor following extended times at high temperatures;
- radiation damage;
- loss of insulation due to mechanical damage; and,
- drift in the measuring instrument.

If a group of sensors have to be calibrated in situ, records from all of them under various reactor operating conditions should be kept.

6.5 Mechanical characteristics

a) Dimensions

The dimensions and tolerances of the sensor and the in-core connecting cable shall be specified. This includes outside dimensions of the cable and sensor, sheath thicknesses and conductor thicknesses together with bending data (numbers of bends, permissible radii, etc.) relevant to the proposed application. This information may be supplemented by an outline diagram. The grain size of the materials of the conductors may also be important.

b) Constructional materials

The principal materials in the sensor structure (metallic conductor and insulator components) shall be identified and certified by the supplier. Information on the major impurity elements is also required where such elements may cause difficulty due to neutron absorption. These elements could cause post irradiation activity which would make handling difficult or lead to premature failure or inaccuracy by transmutation.

c) Shocks and vibrations

Sensors may fail by fatigue or by similar effects when subjected to shocks and vibrations of mechanical or seismic origin and tests can be carried out at the request of the user to determine the influence of these phenomena. The required withstand of the assembly to shock and vibration depends on the safety and operation (availability) objectives. The limiting safety requirements shall be identified according to the safety class for which the assembly comprising the sensors is used, see IEC 61226. The required limits of operation should be identified according to the operational constraints and the objectives.

d) Cable and sensor mounting

Cables and sensors are potentially subject to failure because of inadequate mountings. Mounting procedures and devices, spacing of cables, cable fittings, etc, shall be designed with adequate strength margins. Vibration, thermal expansion and seismic requirements shall be included in the design.

e) Sheath integrity

Cables and sensors are subject to failure because of very small imperfections in their sheaths, particularly at welded or brazed joints. The need for special tests of sheath integrity and to detect potential sources of damage shall be considered.

f) Compatibility

The compatibility (chemical, physical and electrical) of the sensor sheath including that of welds and brazes with all other in-core materials should be demonstrated by analysis or test. In addition, the effect of damage to other reactor components which could result from the breakage of a sensor whilst in service shall be considered when materials are chosen.

g) Sensor finish

The finish and cleanliness of the surface of the sensor and its cable sheath is important. Manufacturer's cleaning procedures shall be examined and specified, the protection of the sensor between its manufacture and its installation shall be demonstrated to be compatible with the expected service conditions. Surface finish and the degree to which the outer sheath of the sensor and its cable is annealed should also be specified.

7 Temperature measurement system design

7.1 General requirements

7.1.1 General

This clause considers the temperature measurements in the primary circuit (inlet or outlet core temperature, pressuriser temperature) or directly in the core of the reactor. Other temperature measurements are not specific to nuclear applications, they are addressed by normal industrial standards.

A temperature measurement system should be designed taking into account all the conditions and requirements that are applied to the sensor itself and to the complete measurement path, including cables and connectors.

The intended use of a temperature sensor and its cable in a specific application should be evaluated by the designer of the system which will use the sensor and its cable.

7.1.2 Environmental conditions

The system design shall evaluate the effects of environmental conditions (temperature, atmosphere, radiation doses and dose rates) on the materials together with the accuracy of the instrument in the proposed application.

Temperature sensors shall not perturb the temperature to be measured to an unacceptable extent and shall not disturb the reactor operation. For example, a fuel thermocouple should not upset coolant flow over the fuel element being measured or its neighbors. A sufficiently representative measurement of the temperature of interest should be obtained. For example, satisfactory bulk measurements of coolant can only be obtained if adequate mixing is provided or arranged.

7.1.3 Classification

The temperature measurement system functions shall be classified according to IEC 61226 and the system shall meet the requirements of IEC 61513.

A temperature measurement system important to safety shall include redundancy where it is needed to meet the single failure criterion. It may include redundancy to improve reliability.

7.1.4 Performance

The system, including the temperature sensor, its installation and, for thermocouples, the reference junction shall be suitable for its proposed purpose in terms of accuracy and response time during normal operation and during and after accidents.

The designer shall consider the accuracy and response time requirements of the functions of each temperature measurement type, and determine these from the safety, performance, control or monitoring requirements. Where significant errors are unavoidable, it may be necessary to calibrate under simulated conditions and apply a correction factor. Various techniques such as thermal irradiation shields are available which can improve accuracy.

A thermocouple equivalent circuit is a voltage source in series with the resistance of the thermocouple. Since the loop resistance may be significant (up to about 200 Ω for a K type thermocouple), the designer should assess it in relation to the measuring system impedance and the tolerable measurement errors.

7.2 Site implementation

7.2.1 Environmental conditions and operation

The possible influence of in-core instrumentation on the operating characteristics of the reactor shall be carefully evaluated and shall be shown to be within acceptable limits. In particular, that evaluation shall consider maximum reactivity transients which can be caused by conceivable malfunctioning of the equipment, possible disturbance to coolant flow in normal and abnormal conditions, any risk that the equipment will disturb the performance of safety actions and the risk of malfunctions which may compromise the integrity of the primary envelope.

The possible consequences of a damaged cable sheath allowing the insulating material to be released into the reactor coolant or the possibility of the reactor coolant leaking out via a cable or cable penetration shall be considered.

This shall also include procedures for replacement of in-core equipment. The procedure which ensures best plant availability should be preferred. The creation of long-lived gamma and beta activity in in-core equipment through neutron activation will usually lead to radiation protection problems during handling procedures. These effects should be carefully considered and minimized as far as possible through the proper choice of structural materials as well as the

mechanical design of the unit. Similar consideration should be given to mechanisms, etc., which are handled during maintenance.

The materials used in the in-core parts of the system shall be acceptable for their functions under the ambient conditions arising in the reactor core. In particular, the influence of long term neutron and gamma radiation and temperature cycling should be known from tests of prototype assemblies or the interpretation of other experimentally obtained data. The effect of radiation on a sensor and its cables shall be considered in the design. It is necessary to know whether radiation changes the calibration characteristic or otherwise damages the unit and whether these effects are short or long term.

The build-up of residual activity shall also be known for handling reasons. The maximum doses and dose rates at the measuring position shall be specified. As the EMF of a thermocouple originates from the Seebeck effect due to temperature gradients along its component wires, total irradiation as well as the dose to the measuring junction may lead to loss of calibration.

The methods used to retain the temperature sensor at the measuring point and to guide the cable to the reactor penetration shall be compatible with the environment in which they will operate.

Chemical compatibility with the environment, differential expansion and adequacy in the event of vibrations and shocks are particularly important. Vibrations and shocks may originate from mechanical or seismic sources.

RTD materials shall be selected that are able to withstand the most severe design basis environmental conditions when materials are near their end of operational life and perform within the specified electrical criteria.

The system shall be designed to facilitate functional testing, if required, of in-core components during reactor operation. Installed spares may, for example, be calibrated against operational instruments. Continuity and insulation testing shall be possible.

The useful life of an in-core assembly should be chosen so that replacement can be achieved without reducing the availability and safety of the plant.

The effect of heat produced by the absorption of radiation shall be allowed for in the system design.

7.2.2 Operating mode

The installation and the operating conditions of the sensor and the cable shall be specified.. The intended use of the signal and the manner in which the sensor is connected to the measuring assembly shall be considered (for example: shielding, earthing of the sensor, connections, electromagnetic disturbances are particularly important in this context).

The expected useful life of a sensor and its cable shall be compatible with the proposed application. It is known that ageing effects can occur. Their importance and the method by which useful life is determined will depend on the particular application.

IEC 62342 provides guidance to manage the ageing of temperature sensors.

7.2.3 Calibration

One method of in situ calibration is to make one sensor of the group removable so that a freshly calibrated unit can be inserted. This entails installing a guide tube and incorporating sensor location points in the guide tube assembly at the design stage. If particularly accurate temperature measurements are required, the sensors may be made removable so that

calibrated units can be inserted at intervals of time which will vary, depending on the temperature and irradiation situation.

The reactor temperature conditions shall be stable during calibration. Details of methods of calibration are given in IEC 62385.

7.2.4 Measuring range and accuracy

The measuring range (plus an adequate margin for over-temperature) for a given degree of accuracy shall be specified bearing in mind the limitations of the measuring assembly. The temperature which limits useful life and the expected temperature distribution along the sensor and its cable may also need to be specified.

7.2.5 Electrical conditions

The acceptable electrical insulation leakage of the sensor and cable shall be specified at both room temperature and under the most severe operating conditions. This leakage may be dependent upon the test voltage and the maximum test voltage may need to be specified. The loop resistance of the conductors may also be important

The insulation resistance of a mineral insulated thermocouple should be checked before installation and at major shutdowns, and device failure is likely if it is below about 1 M Ω .

A hot thermocouple loop resistance of up to 200 Ω may exist, and the designer should consider a tolerable limit for testing.

Electromagnetic disturbances and other sources of background signal such as cable microphony and signals due to concomitant irradiation (self-powered effect) shall not produce unacceptable errors. Self-powered effects on thermocouples can produce high voltages across the capacitance of the thermocouple to earth, if its insulation resistance is high. The measuring system should be designed to tolerate or discharge such voltages.

If movable contacts are used in connecting temperature sensors, the design should be such that no significant errors are introduced by these contacts under steady or under dynamic temperature conditions. Cable connectors shall be of a quality commensurate with the proposed application.

Cable routes shall be selected to prevent fouling by moving machinery such as the fuelling machine. If the measurements are important to safety, the cable routes shall also satisfy separation requirements to meet relevant single failure requirements and to avoid common cause failures. Some measurements can be used for post-accident monitoring, and these shall also satisfy separation requirements to avoid common cause failures. For cable routing and segregation, see IEC 60709.

Operations on several types of reactor involve access to or disconnection or removal of thermocouples that monitor fuel elements or fuel channel outlet temperatures. This is of particular importance during refueling operations. The design of the disconnection facilities and the radiation exposure to operatives during disconnection or replacement, and facilities for testing of the thermocouples, should be carefully considered.

Loops may be necessary to avoid possible stress on cables when structural members move relative to each other under the effects of temperature. Photographs of the installation should be taken to help resolve difficulties which may arise after the primary envelope has been sealed.

The method of identifying sensors and their cables during reactor installation shall be specified.

8 Requirements for tests

8.1 General

The following test requirements are of particular importance in reactor applications and these requirements should be included in any ordering, manufacturing and test schedule. The inclusion of these items could lead to a specification which is more difficult to meet than that normally used for non-nuclear industrial applications. Standard test methods for RTDs described in IEC 60751 should be taken as a guide for developing the production testing schedule.

8.2 Pre-production testing

- a) Pre-production tests shall be performed to demonstrate that the design of the proposed temperature measuring sensor will meet the specification. These tests may include experiments on the effect of vibrations and shocks and the effect of radiation damage.
- b) Prototype tests should also be carried out on individual components of the system such as connectors, methods of fitment to the sensor, reliability of hot junction welds in the case of thermocouples, corrosion behaviour, etc.
- c) The manufacturer shall use adequate quality assurance procedures and should have the resources to minimize the consequences of unexpected production difficulties and noncompliance with production tests.

8.3 Production processes and testing

8.3.1 General

The following factors shall be considered in specifying a production programme and a schedule of production tests which apply to sheathed thermocouples and to RTDs:

- a) Manufacturing materials shall be approved. In particular, the surface of components shall be free from contamination by nuclear poisons such as boron, cadmium and gadolinium, by materials that may become a source of corrosion and by chemically reactive materials such as chlorine. Unacceptable lubricants and other injurious materials shall be excluded.

The materials used for the manufacture of cable and sensor sheaths shall be in accordance with the specification and shall be free from harmful defects which might shorten the sensor's useful life. The insulating materials shall have a composition designed to ensure high-insulation resistance, freedom from corrosion and acceptable irradiation performance throughout the sensor life.

- b) Cables shall be correctly processed and tested. This should include tests or evidence of conformity of materials to show
 - heat treatment to ensure correct annealing and grain size;
 - tests to ensure conductor geometry;
 - sheath integrity tests to ensure freedom from holes;
 - sheath and conductor ductility tests;
 - tests to ensure correct conductor resistance and insulant insulation resistance;
 - tests for susceptibility to corrosion;
 - tests to ensure that the sheath has adequately uniform thickness and is free from sources of potential failures.

The method of the insulation resistance measurement shall be specified.

- c) All sensors and cable sheaths shall be cleaned by an approved process. After cleaning, they shall be inspected for surface finish and leak tested to ensure integrity.
- d) Every completed sensor shall be calibrated and a test certificate supplied.
- e) Every completed sensor and cable shall be labeled with its type, a serial number, the length of its cable and the name of the cable manufacturer. It shall be supplied in an

approved container which will protect it during transport, storage and handling at the reactor site.

- f) Documentation, such as certificates of witnessed tests, etc., shall be agreed between the manufacturer and the purchaser. This documentation should make it possible to ensure compliance with this standard and other applicable or agreed standards which relate to materials and their purity.
- g) It is possible to damage mineral insulated cables by the application of excessive test voltages. The maximum test voltages to be used during insulation resistance measurements shall be specified.

8.3.2 Factors for sheathed thermocouples

- a) Thermocouples shall be made from approved cables which satisfy the requirements of item a) of Sub-clause 8.3.1. Conductor materials shall conform to appropriate thermocouple standards and the manufacturer should certify to the purchaser compliance with these requirements. Checks to verify the thermoelectric EMF of the conductors should be carried out.
- b) The welding of junctions and the closure of cable sheaths shall be carried out by approved processes. Electrical insulation, conductor loop resistance and radiographic tests including radiographs of the hot junction should be carried out on all units. Tests for metallurgical conditions such as metallographic examination or ductility and corrosion tests shall be carried out on a small sample basis.
- c) Both ends of the thermocouple shall be sealed before shipment from the manufacturer's works.

8.3.3 Factors for RTD

- a) RTDs are fabricated from a relatively large number of components and quality control during assembly is important. Components selection shall be carefully carried out.
- b) RTDs are vulnerable to shock and vibration and such tests shall be included in the manufacturing schedule on a sampling basis.

8.4 Tests on site

The installation and final test sequence shall include at least the following procedures:

- a) Each sensor shall be carefully examined for possible damage during transportation.
- b) The loop resistance and insulation resistance of the transducer shall be measured at the specified test voltages before installation and compared with that given on the test certificate.
- c) Test b) shall be repeated after installation in the primary envelope. This test shall be applied as close as possible to the sensor, possibly from a junction box immediately outside the envelope.
- d) The total loop resistance and insulation resistance shall be measured from the last junction box before the measuring instrument.
- e) The readings from tests b), c) and d) above shall be recorded for subsequent use in fault analysis.
- f) The sensor performance in situ shall be checked and confirmed.

NOTE Insulation resistance tests cannot be carried out on non-insulated junction thermocouples.

9 Qualification tests

9.1 Principles

The objective of the qualification process is to demonstrate the capability of sensors to operate in the extreme conditions in which they may be used and to withstand certain specific hazards including seismic events. The qualification process for sensors is defined according to IEC 60780 and IEC 60980. It should be based on tests on prototypes or on sensors

selected at random from a batch. These tests should be combined with tests on separate components or on similar sensors. An analysis and arguments from previous tests on similar sensors should be added in order to demonstrate the performances and the qualification.

9.2 Test sequence on a sensor

The test sequence is defined according to the operating and environmental conditions of the sensor.

Each sensor may be operated inside its thermowell. The possible influence of the assembly shall be taken into account for the tests.

Before the test sequence, the characteristics of the sensor as defined in the factory test sequence are measured. After the test sequence, these characteristics are measured again to confirm that the sensor is still operating. During some tests, the signal is recorded to check functional performance.

9.3 Test for environmental conditions

9.3.1 Temperature test

The temperature sensor may have been type tested to a suitable maximum temperature, and it can be acceptable on that basis. However, where sensors perform functions of category A, equipment qualification maximum test temperatures shall be determined in accordance with the normal and extreme conditions of operation and fault conditions. In some cases, the test should be performed with the assembly around the sensor. The procedure shall define the maximum temperature. During the test, the signal shall be recorded to detect any abnormal operation.

9.3.2 Pressure test

Agreed tests on the sensor's characteristics shall be performed before and after any such pressure simulation and the results of these tests shall be unchanged within specified limits.

9.3.3 Other tests

Special or additional tests should be carried out on prototypes depending on specific operational conditions.

9.4 Seismic tests

When a sensor, with its assembly, is used to perform safety functions (category A or in some cases, category B according to IEC 61226), it shall withstand a seismic event. The test procedure, conditions and criteria are defined in IEC 60980.

The signal from the sensor shall be monitored during the test in order to reveal any failure or abnormal disturbance.

Bibliography

IEC 60050-393, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 393: Nuclear instrumentation – Physical phenomena and basic concepts*

IEC 60050-394, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 394: Nuclear instrumentation – Instruments, systems, equipment and detectors*

IAEA, *Safety Glossary: Edition 2007*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	28
INTRODUCTION.....	30
1 Domaine d'application	32
2 Références normatives.....	32
3 Termes et définitions	33
4 Considérations générales	35
4.1 Exigences relatives aux mesures de température	35
4.2 Applications de sûreté	36
4.3 Conditions nucléaires	36
5 Capteurs de température	37
5.1 Sondes à résistance	37
5.2 Thermocouples.....	38
5.3 Autres capteurs de température	39
5.4 Comparaison entre les sondes à résistance et les thermocouples	40
6 Caractéristiques des capteurs de température.....	40
6.1 Généralités.....	40
6.2 Installation	40
6.2.1 Doigt de gant.....	40
6.2.2 Câbles.....	41
6.3 Caractéristiques fonctionnelles.....	41
6.3.1 Sensibilité	41
6.3.2 Temps de réponse.....	41
6.3.3 Linéarité	41
6.4 Exactitude des mesures de température.....	42
6.5 Caractéristiques mécaniques.....	42
7 Conception du système de mesure de température	43
7.1 Exigences générales	43
7.1.1 Généralités.....	43
7.1.2 Conditions d'environnement d'ambiance.....	43
7.1.3 Classement	44
7.1.4 Performances	44
7.2 Installation sur site	44
7.2.1 Conditions d'environnement et exploitation.....	44
7.2.2 Mode de fonctionnement	45
7.2.3 Etalonnage	45
7.2.4 Etendue de mesure et exactitude	46
7.2.5 Conditions électriques	46
8 Exigences relatives aux essais	47
8.1 Généralités.....	47
8.2 Essais de présérie.....	47
8.3 Procédé de fabrication et essais de série	47
8.3.1 Généralités.....	47
8.3.2 Facteurs applicables aux thermocouples	48
8.3.3 Facteurs applicables aux sondes à résistance	48
8.4 Essais sur le site.....	48
9 Essais de qualification.....	49

9.1	Principes	49
9.2	Séquence d'essais sur un capteur	49
9.3	Essais pour les conditions d'environnement	49
9.3.1	Essais de température	49
9.3.2	Essais de pression	49
9.3.3	Autres essais	49
9.4	Essais sismiques	49
	Bibliographie	51
	Tableau 1 – Comparaison des caractéristiques des sondes à résistance avec celles des thermocouples	40

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CENTRALES NUCLÉAIRES DE PUISSANCE – INSTRUMENTATION IMPORTANTE POUR LA SÛRETÉ – CAPTEURS DE TEMPÉRATURE (DANS LE CŒUR ET LE CIRCUIT PRIMAIRE) – CARACTÉRISTIQUES ET MÉTHODES D'ESSAI

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 propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60737 a été établie par le sous-comité 45A: Instrumentation et contrôle-commande des installations nucléaires, du comité d'études 45 de la CEI: Instrumentation nucléaire.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition publiée en 1982. Cette édition constitue une révision technique.

Les modifications principales par rapport à l'édition précédente sont les suivantes:

- mettre à jour les références aux nouvelles normes éditées depuis la première publication et en particulier les publications: CEI 61513, CEI 61226;
- intégrer une description comparative des performances des thermocouples et des sondes à résistance;

- discuter des exigences pour les systèmes de mesure de température dans les réacteurs;
- adapter les définitions;
- mettre à jour la présentation en conformité avec les Directives actuelles ISO/CEI sur le style des normes.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
45A/800/FDIS	45A/806/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

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

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

a) Contexte technique, questions importantes et structure de la présente norme

La présente norme CEI s'intéresse plus particulièrement à la question des capteurs de température utilisés principalement dans les systèmes d'instrumentation du cœur et du circuit primaire. Elle décrit les principes, les caractéristiques et les méthodes d'essai des capteurs de température, y compris sondes à résistance et thermocouples.

Elle est organisée autour des points suivants:

- les définitions,
- les descriptions des différents types de capteurs de température,
- la conception système,
- l'analyse des facteurs d'influence,
- les conditions de fonctionnement des capteurs,
- les essais en usine,
- les essais de qualification.

L'objectif de la présente norme est d'être utilisée par les exploitants de centrales nucléaires, les évaluateurs de système et par les régulateurs.

b) Position de la présente norme dans la collection de normes du SC 45A de la CEI

La CEI 60737 est le document du SC 45A de la CEI de troisième niveau qui traite de la question des caractéristiques et des méthodes d'essai des capteurs de température utilisés dans les réacteurs de puissance.

Pour plus de détails sur la collection de normes du SC 45A de la CEI, voir le paragraphe d) de cette introduction.

c) Recommandations et limites relatives à l'application de la présente norme

Il n'y a aucune recommandation ou limitation concernant l'application de la présente norme.

d) Description de la structure de la collection des normes du SC 45A de la CEI et relations avec d'autres documents de la CEI et d'autres organisations (AIEA, l'ISO)

Le document de niveau supérieur de la collection de normes produites par le SC 45A de la CEI est la CEI 61513. Cette norme traite des exigences relatives aux systèmes et équipements d'instrumentation et de contrôle-commande (systèmes d'I&C) utilisés pour accomplir les fonctions importantes pour la sûreté des centrales nucléaires, et structure la collection de normes du SC 45A de la CEI.

La CEI 61513 fait directement référence aux autres normes du SC 45A de la CEI traitant de sujets génériques, tels que la catégorisation des fonctions et le classement des systèmes, la qualification, la séparation des systèmes, les défaillances de cause commune, les aspects logiciels et les aspects matériels relatifs aux systèmes programmés, et la conception des salles de commande. Il convient de considérer que ces normes, de second niveau, forment, avec la CEI 61513, un ensemble documentaire cohérent.

Au troisième niveau, les normes du SC 45A de la CEI, qui ne sont généralement pas référencées directement par la CEI 61513, sont relatives à des matériels particuliers, à des méthodes ou à des activités spécifiques. Généralement ces documents, qui font référence

aux documents de deuxième niveau pour les activités génériques, peuvent être utilisés de façon isolée.

Un quatrième niveau qui est une extension de la collection de normes du SC 45A de la CEI correspond aux rapports techniques qui ne sont pas des documents normatifs.

La CEI 61513 a adopté une présentation similaire à celle de la CEI 61508, avec un cycle de vie et de sûreté global, un cycle de vie et de sûreté des systèmes, et une interprétation des exigences générales des parties 1, 2 et 4 de la CEI 61508 pour le secteur nucléaire. La conformité à la CEI 61513 facilite la compatibilité avec les exigences de la CEI 61508 telles qu'elles ont été interprétées dans l'industrie nucléaire. Dans ce cadre, la CEI 60880 et la CEI 62138 correspondent à la CEI 61508-3 pour le secteur nucléaire.

La CEI 61513 fait référence aux normes ISO ainsi qu'au document AIEA GS-R-3 pour ce qui concerne l'assurance qualité.

Les normes produites par le SC 45A de la CEI sont élaborées de façon à être en accord avec les principes de sûreté fondamentaux du Code AIEA sur la sûreté des centrales nucléaires, ainsi qu'avec les guides de sûreté de l'AIEA, en particulier avec le document d'exigences NS-R-1 qui établit les exigences de sûreté relatives à la conception des centrales nucléaires et avec le guide de sûreté NS-G-1.3 qui traite de l'instrumentation et du contrôle commande importants pour la sûreté des centrales nucléaires. La terminologie et les définitions utilisées dans les normes produites par le SC 45A sont conformes à celles utilisées par l'AIEA.

CENTRALES NUCLÉAIRES DE PUISSANCE – INSTRUMENTATION IMPORTANTE POUR LA SÛRETÉ – CAPTEURS DE TEMPÉRATURE (DANS LE CŒUR ET LE CIRCUIT PRIMAIRE) – CARACTÉRISTIQUES ET MÉTHODES D'ESSAI

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale est applicable aux aspects généraux de la conception, de la fabrication et des méthodes d'essai des systèmes et composants de l'instrumentation de mesure de la température utilisés dans le cœur et le circuit primaire des réacteurs nucléaires de puissance.

Ce type de capteur comprend les thermocouples et les sondes à résistance. L'accent est mis sur les caractéristiques propres aux applications du domaine nucléaire et des recommandations sont faites pour les composants et les capteurs seulement lorsque ceux-ci sont installés à l'intérieur de l'enveloppe du circuit primaire et/ou en présence de champs de rayonnements de niveau élevé.

Les conditions imposées par l'utilisation dans un réacteur sont souvent différentes de celles rencontrées dans des applications non nucléaires. Certaines parties du système de mesure de la température en cœur peuvent être installées en environnement très sévère.

L'exposition à de fortes doses en neutrons et gamma est capable de provoquer des erreurs de mesure dues à des transformations nucléaires, à l'échauffement et à des modifications structurales, et d'affecter les propriétés mécaniques et électriques des équipements, de sorte qu'il faut veiller avec soin aux normes respectées lors de l'installation et au choix des matériaux.

De plus il est nécessaire de prendre en compte lors de la conception les effets liés aux hautes pressions, aux hautes températures, aux gradients de températures importants et aux cycles de température de l'environnement, ainsi que l'impact que le système de mesure de la température peut avoir sur la sûreté ou sur les performances économiques du réacteur.

Les conséquences liées aux conditions nucléaires sur les capteurs de température sont à l'origine des exigences strictes en matière de qualification.

La présente norme qui traite des exigences particulières propres aux capteurs de température utilisés pour des applications nucléaires, a deux objectifs:

- a) fournir un guide support permettant de garantir au mieux que les conditions de fonctionnement du réacteur n'endommageront pas les capteurs de température;
- b) garantir que le système de mesure de température en cœur et l'installation des capteurs ne portent pas atteinte à la sûreté de fonctionnement et à la disponibilité du réacteur.

Des dispositions applicables de façon générale sont données, mais les considérations détaillées sont seulement applicables aux thermocouples et aux sondes à résistance.

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 60584-1, *Couples thermoélectriques – Partie 1: Tables de référence*

CEI 60584-2, *Couples thermoélectriques – Partie 2: Tolérances*

CEI 60584-3, *Couples thermoélectriques – Partie 3: Câbles d'extension et de compensation – Tolérances et système d'identification*

CEI 60709, *Centrales nucléaires de puissance – Systèmes d'instrumentation et de contrôle commande importants pour la sûreté – Séparation*

CEI 60751, *Thermomètres à résistance de platine industriels et capteurs thermométriques en platine*

CEI 60780, *Centrales nucléaires – Equipements électriques de sûreté – Qualification*

CEI 60980, *Pratiques recommandées pour la qualification sismique du matériel électrique du système de sûreté dans les centrales électronucléaires*

CEI 61226, *Centrales nucléaires de puissance – Instrumentation et contrôle-commande importants pour la sûreté – Classement des fonctions d'instrumentation et de contrôle-commande*

CEI 61513, *Centrales nucléaires – Instrumentation et contrôle-commande des systèmes importants pour la sûreté – Prescriptions générales pour les systèmes*

CEI 61515, *Câbles et couples thermoélectriques à isolation minérale dits 'chemisés'*

CEI 62342, *Centrales nucléaires de puissance – Systèmes d'instrumentation et de contrôle-commande importants pour la sûreté – Gestion du vieillissement*

CEI 62385, *Centrales nucléaires de puissance – Instrumentation et contrôle-commande importants pour la sûreté – Méthodes d'évaluation des performances des chaînes d'instrumentation des systèmes de sûreté*

CEI 62397, *Centrales nucléaires de puissance – Instrumentation et contrôle-commande importants pour la sûreté – Sondes à résistance*

CEI 62460, *Tableaux température – Force électromotrice (F.É.M.) pour les combinaisons de couples thermoélectriques à éléments purs*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions du Glossaire de Sûreté de l'AIEA édition 2007, de la CEI 60050-393 et de la CEI 60050-394 sont applicables ainsi que les suivants:

3.1

exactitude de mesure

étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et la valeur conventionnellement vraie du mesurande

[VEI 394-40-35]

NOTE 1 « L'exactitude » est un concept qualitatif.

NOTE 2 Le terme « précision » ne doit pas être employé à la place de « exactitude ».

3.2

shunt électrique

mise en dérivation de l'impédance de l'élément sensible avec l'impédance du dispositif de mesure et l'impédance de fuite par rapport à la terre

3.3

capteur de température post-accidentel

capteur de température conçu pour résister et mesurer des températures très élevées qui peuvent dépasser les 1 100 °C, ce qui peut arriver si les éléments combustibles ne sont pas suffisamment refroidis

3.4

sonde à résistance (SR)

détecteur généralement constitué d'un fût cylindrique en acier inoxydable protégeant une résistance en platine dont la résistance varie avec la température. Ce détecteur est placé dans le conduit contenant le fluide dont la température est ainsi mesurée. Il peut être directement immergé dans le fluide ou protégé par une enveloppe intermédiaire appelée doigt de gant

NOTE 1 Les moyens de montage ou les têtes de branchement peuvent être comprises. La résistance sensible à la température peut être en platine, en nickel-tungstène, en cuivre ou constituée d'autres métaux. Cependant, les sondes en platine sont couramment utilisées dans les centrales nucléaires; ainsi cette norme fait référence aux SR au platine.

NOTE 2 Dans cette norme le terme «capteur» décrit la SR et toutes les protections associées, par exemple l'enveloppe cylindrique ou le doigt de gant. Dans les centrales nucléaires, pour la plupart des applications de mesure de la température de fluide, la résistance de platine est montée dans un doigt de gant en acier inoxydable. Pour la mesure de la température de l'air, la résistance peut être directement utilisée.

[CEI 62397, 3.5]

3.5

sensitivité

pour une valeur donnée de la grandeur mesurée, quotient de la variation de la variable observée par la variation correspondante de la grandeur mesurée

[VEI 394-39-07, modifiée]

3.6

durée de vie utile

période qui va de la mise en exploitation initiale d'une structure, d'un système ou d'un composant à sa réforme

[Glossaire de sûreté de l'AIEA, édition 2007]

NOTE La durée de vie utile pour un capteur de température correspond à la durée de vie en exploitation en conditions d'environnement et d'irradiation se situant à l'intérieur d'un domaine spécifié, après quoi les caractéristiques du capteur sont hors des tolérances spécifiées. Ceci peut être exprimé en terme de débit de particules incidents, de durée d'exploitation, etc.

3.7

thermocouple gainé

thermocouple noyé dans un isolant minéral, à l'intérieur d'un tube de protection métallique imperméable aux gaz qui lui sert de gaine, avec deux fils de prolongation sortant à travers un joint hermétique à l'humidité pour brancher un système électronique de mesure

3.8

capteur de température

dispositif, fixe ou mobile, conçu pour fournir un signal de mesure de la température en un point défini, dans le cœur d'un réacteur ou dans le circuit primaire de refroidissement

NOTE Les sondes à résistance et les thermocouples, tels que des thermocouples gainés, des thermocouples à jonction isolée ou des thermocouples à jonction non isolée, en sont des exemples.

3.9

système de mesure de la température

systèmes utilisant des capteurs de température dans le cœur, conçus pour la mesure de la température du réfrigérant primaire, du combustible, du modérateur et des structures du réacteur

NOTE Ce système peut soit constituer une partie, soit être indépendant du système général de surveillance du cœur qui fournit les informations nécessaires au fonctionnement normal du réacteur. Un système de mesure de la température comprend tous les composants nécessaires à la production de l'information ou du signal représentant la température à l'endroit où le capteur est installé. Les composants sont: le capteur de température lui-même, le doigt de gant, les câbles, les connecteurs, le système électronique.

3.10

thermocouple

dispositif de mesure de la température dont le principe repose sur l'utilisation de deux conducteurs constitués de métaux différents, soudés ensemble à leurs deux extrémités pour former deux jonctions

NOTE Une jonction est placée à l'endroit où l'on cherche à mesurer la température, l'autre est à une température de référence froide. L'augmentation du signal au niveau du thermocouple a pour origine l'effet Seebeck qui produit une tension variant en fonction de la différence de température entre les deux jonctions.

3.11

doigt de gant

enveloppe de protection de SR, de thermocouples, ou d'autres capteurs de température. Le doigt de gant est utilisé pour faciliter le remplacement des capteurs de température

[CEI 62385, 3.19]

4 Considérations générales

4.1 Exigences relatives aux mesures de température

La température est un paramètre fondamental lié au procédé nucléaire dans le réacteur. Elle peut être mesurée au moyen de capteurs particuliers dans le but de réaliser les principales fonctions de sûreté suivantes:

- surveiller la température du système de refroidissement pour respecter les conditions d'exploitation en ce qui concerne les paramètres de conception;
- mesurer la puissance thermique du réacteur en combinant la mesure de température avec la mesure de débit du réfrigérant;
- surveiller la température des éléments combustibles de façon à éviter un incident d'ébullition ou de fusion de l'élément combustible lui-même.

Les mesures de température sont nécessaires sur le combustible, dans le modérateur, dans le réfrigérant ou sur les parties de structures supportant le cœur. Elles servent à des fins de commande, au système de protection, pour la surveillance des arrêts et des accidents ou pour recueillir des renseignements plus généraux sur le réacteur ou ses composants.

Dans un réacteur de puissance pourvu d'un cœur de grandes dimensions, il peut être important de surveiller non seulement les températures moyennes, mais aussi leur distribution spatiale. Il est possible d'utiliser des mesures prises en des points particuliers avec le contrôle de parties spécifiques du cœur, pour garantir des marges de sécurité suffisantes aux paramètres de protection du système, ou pour assurer l'utilisation optimale du combustible.

Certaines mesures en cœur peuvent aussi être nécessaires, pour préserver le combustible des dégâts causés par des perturbations locales du débit de réfrigérant ou par des variations transitoires de la puissance locale. Dans la plupart des cas, les capteurs sont utilisés pour mesurer directement la température, mais il existe parfois des applications pour lesquelles l'information est déduite des fluctuations de la température. Citons, à titre d'exemple pour ce

dernier cas, le débit du réfrigérant qui se déduit par corrélation des fluctuations mesurées à l'aide de deux capteurs séparés géographiquement.

La mesure de la température en cœur dans un réacteur à eau est importante pour ce qui concerne le rendement et l'utilisation du combustible, et celle-ci peut être réalisée par des sondes introduites dans des canaux particuliers du réacteur ou par des détecteurs installés de façon permanente. Les mesures à partir de ces capteurs sont normalement réalisées à intervalles réguliers, et sont suivies de calculs permettant d'évaluer les conditions de chaque canal combustible surveillé.

Pour toutes ces applications, l'environnement ambiant est hostile et la qualité de la mesure de température est importante pour la sûreté ou pour l'exploitation.

Les signaux de température peuvent être mesurés de manière continue ou discontinue selon le type d'application, ce qui ordinairement, n'affecte pas la conception de l'installation en cœur.

4.2 Applications de sûreté

Les capteurs de température utilisés par un système réalisant des fonctions de sûreté classées conformément à la CEI 61226, doivent satisfaire aux exigences pertinentes associées à la classe de sûreté des fonctions. Si les mesures sont importantes pour la sûreté, les chemins de câbles doivent aussi satisfaire aux exigences de séparation pertinentes en ce qui concerne le critère de défaillance unique et pour éviter les défaillances de cause commune, voir la CEI 60709.

Suite à un accident, le refroidissement des éléments combustibles risque d'être dégradé et la température interne du combustible peut augmenter fortement. La fusion d'un élément combustible peut survenir et, si le réfrigérant est de l'eau, une réaction chimique entre les gaines et l'eau peut produire une grande quantité d'hydrogène. Il convient de surveiller les conditions post accidentelles en utilisant des mesures de température capables de résister à de très hautes températures (par exemple au-delà de 1 100 °C pour les réacteurs à eau légère). La température maximale à mesurer et l'implantation des capteurs doivent être spécifiés par le concepteur du réacteur.

4.3 Conditions nucléaires

Les conditions nucléaires propres au circuit de réfrigérant ou à l'intérieur de la cuve du réacteur sont très particulières et notablement différentes des conditions trouvées en général pour les autres industries. Ces conditions présentent les caractères suivants:

- Débits de dose élevés dus aux rayonnements gamma et aux neutrons élevés, en notant que:
 - sous l'influence des débits de dose élevés dus aux rayons gamma, les matériaux organiques subissent des détériorations du fait de la modification des liaisons moléculaires;
 - sous l'influence des neutrons rapides, la structure atomique des matériaux organiques et minéraux change. Ce phénomène entraîne une modification des caractéristiques;
 - les neutrons thermiques provoquent de l'activation.
- Les capteurs n'étant habituellement pas facilement accessibles, ils doivent présenter une fiabilité très élevée, et les composants électroniques doivent être éloignés de la zone radioactive.
- Un réacteur fonctionne en permanence avec des conditions d'environnement hostiles et pendant très longtemps.

Un capteur de température adapté aux applications nucléaires diffère d'un capteur destiné aux utilisations industrielles classiques sur les points suivants:

- sa qualification aux conditions environnementales normales et nucléaires;
- l'assurance qualité conforme aux normes du nucléaire en fonction des exigences.

5 Capteurs de température

5.1 Sondes à résistance

Une sonde à résistance est un capteur de température dont la résistance augmente en fonction de la température. Une sonde à résistance est constituée d'une bobine ou d'un dépôt de métal pur. Les sondes à résistance peuvent être faites avec des métaux variés (Pt, Cu, Ni..) et avoir différentes résistances, mais les plus courantes sont les sondes à résistance au platine avec une résistance nominale de 100 Ω à 0 °C. Pour les applications nucléaires sur les réacteurs refroidis à l'eau, l'utilisation des sondes à résistance d'un seul type permet d'avoir une meilleure cohérence au niveau des mesures et une maintenance plus facile.

Les deux normes suivantes fournissent des éléments d'informations supplémentaires sur les sondes à résistance:

- CEI 60751:2008;
- CEI 62397:2007.

La relation entre la résistance et la température est donnée par la formule de Callendar-Van Dusen:

$$R = R_0 (1 + AT + BT^2)$$

où

T = est la température en °C – dans la gamme de 0 °C à 1 300 °C;

R = est la résistance (Ω) à la température T ;

R_0 = est la résistance à 0 °C (référence);

A et B sont des coefficients.

Le coefficient B est relativement petit (environ $6 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$) et donc la résistance varie de façon presque linéaire en fonction de la température, et pour la suite de la présente norme on considère cette variation comme linéaire.

Il peut être difficile d'utiliser des sondes à résistance car elles présentent une résistance relativement faible et qui évolue peu en fonction de la température (moins de 0,4 $\Omega/^\circ\text{C}$). Pour mesurer ces petites variations de résistance avec précision, il convient d'utiliser des configurations de connexions particulières pour minimiser les erreurs dues aux câbles de raccordement.

Typiquement, une sonde à résistance peut être utilisée suivant 3 montages différents: avec 2, 3, ou 4 fils. Le type de montage conditionne directement l'exactitude. Le montage à 4 fils offre la meilleure exactitude.

L'élément sensible de la sonde à résistance peut être un fil métallique ou un dépôt métallique sur un matériau isolant. A cause du principe de mesure, l'élément sensible doit être protégé dans une gaine remplie d'une matière minérale isolante.

La sonde à résistance étant un appareil résistif passif, un courant doit traverser l'élément sensible pour produire une tension mesurable. Ce courant entraîne un échauffement de la sonde à résistance, qui génère une erreur. L'auto échauffement est généralement défini comme la puissance nécessaire pour élever la température de la sonde à résistance de 1 °C, et habituellement exprimé en mW/°C.

L'auto échauffement peut être minimisé en utilisant le courant d'excitation le plus faible possible. Le niveau d'auto échauffement dépend aussi du milieu dans lequel la sonde à résistance est immergée.

Les sondes à résistance peuvent avoir différentes formes, et elles présentent dans certains cas de meilleures caractéristiques en terme de stabilité, d'exactitude et de répétitivité, que les thermocouples.

Les sondes à résistance ont une résistance qui varie linéairement en fonction de la température. Elles sont caractérisées par:

- une excellente exactitude;
- une gamme de fonctionnement étendue, jusqu'à 600 °C;
- une dérive faible.

La norme CEI 60751 définit deux classes de performance pour les sondes à résistance, Classe A et Classe B. Ces classes de performance définissent les tolérances au point de fusion de la glace et l'exactitude portant sur la température.

- Classe A: sondes à résistance de meilleures exactitude et tolérances;
- Classe B: sondes à résistance avec une exactitude des tolérances courantes.

Les précautions à prendre pour les sondes à résistance sont les mêmes que celles requises pour les thermocouples, en particulier: utilisation d'une protection, des fils sous forme de paires torsadées, d'un gainage approprié, réduction des contraintes mécaniques et des forts gradients thermiques et utilisation de câbles d'extension avec une section de fil importante.

Un problème lié à la mesure avec les sondes à résistance est dû à la masse de l'ensemble de mesure qui peut avoir par lui-même une influence sur la réponse aux variations de température, du fait du retard lié à la conduction thermique. Ceci est un problème plus gênant pour les sondes à résistance que pour les thermocouples car généralement la masse associée aux sondes à résistance est bien supérieure à celle associée aux thermocouples. Ce phénomène, connu sous le nom de « shunt thermique », a un impact sur la mesure de la température par conduction thermique, et plus précisément à l'intérieur du capteur lui-même.

On utilise de préférence les sondes à résistance en dessous de 400 °C.

5.2 Thermocouples

Les thermocouples sont des dispositifs sensibles à la température qui convertissent une différence de température en une tension électrique.

Le principe de base repose sur l'existence d'une tension au contact entre deux métaux différents et sur le fait que cette tension varie lorsque la température varie. Les thermocouples mesurent la différence de température entre deux points, et non une température absolue. Pour les applications classiques, une des jonctions – la jonction froide – est maintenue à une température de référence connue, alors que l'autre est assujettie à la sonde de mesure.

Les normes suivantes: CEI 60584, CEI 61515 et CEI 62460 fournissent des exigences générales applicables aux thermocouples.

Les systèmes de mesure de température utilisant des thermocouples mettent en oeuvre une jonction froide artificielle dont la température est mesurée par un autre élément sensible, tels qu'un thermistor ou une diode. La tension obtenue pour la jonction froide permet de déterminer les corrections à apporter. Ce dispositif est nommé « compensation de soudure froide ».

En pratique, cependant, seulement quelques types de thermocouples ont été normalisés car leurs coefficients de température sont très reproductibles, ils sont robustes, et peuvent produire des tensions de sortie assez élevées. Les types de thermocouples les plus courants dans l'industrie sont nommés J, K, N, R, T, S, B, E. Les différences de température de jonction peuvent être déduites à partir des différences de tensions et les valeurs correspondantes peuvent être tirées de tableaux normalisés (série CEI 60584). Pour les applications nucléaires sur les réacteurs à eau, on préfère utiliser les types K et N. L'utilisation d'un seul type de thermocouples sur une installation offre une meilleure cohérence et facilite la maintenance.

On répartit généralement les thermocouples en deux groupes:

- les thermocouples à métaux nobles de types S, R, B, ces thermocouples peuvent être utilisés pour des températures de fonctionnement allant jusqu'à 1 700 °C;
- les thermocouples à métaux de base de types E, J, K, N, T, ces thermocouples peuvent être utilisés pour des températures de fonctionnement en dessous de 1 100 °C, la gamme de température de chaque type étant particulière.

L'élément sensible d'un thermocouple est la jonction entre les deux différents fils métalliques. Il est possible de fixer la jonction directement sur le corps de l'objet dont on veut mesurer la température, mais il est souhaitable de protéger les fils dans une gaine. La gaine est un tube métallique fin rempli de matière minérale isolante.

La jonction sensible peut être ou:

- fixée sur le tube métallique, pour un thermocouple non gainé; ou,
- isolée du tube métallique, pour un thermocouple gainé.

Pour la température sur le circuit primaire, les types gainés sont recommandés car ils ont tendance à être moins sujets à la diminution de leur exactitude et à la production de signaux parasites provoqués par des défauts ou des perturbations électromagnétiques.

Les thermocouples peuvent être utilisés sur une gamme étendue de température allant jusqu'à 1 700 °C. Leur principale limitation est l'exactitude.

La série de normes CEI 60584 couvre les exigences générales applicables aux thermocouples et à leurs câbles.

5.3 Autres capteurs de température

D'autres capteurs de température existent, par exemple:

- des bilames convertissent une variation de température en déplacement mécanique;
- des fibres optiques peuvent être utilisées pour mesurer la température en fonction des variations des caractéristiques lumineuses de la fibre;
- des thermistors dont la résistance change en fonction de la température sont comparables aux sondes à résistance. Cependant ils peuvent avoir des coefficients de température positifs comme négatifs. Ce qui caractérise principalement les thermistors est leur bonne sensibilité, par contre ils ont une gamme de fonctionnement limitée qui n'est pas compatible avec les applications nucléaires.

En pratique, ces capteurs ne sont pas utilisés en centrales nucléaires et ne sont pas couverts par la présente norme.

5.4 Comparaison entre les sondes à résistance et les thermocouples

Ce paragraphe fournit une comparaison entre les caractéristiques des sondes à résistance et les thermocouples pour aider au choix du type de capteur pour les applications nucléaires.

Tableau 1 – Comparaison des caractéristiques des sondes à résistance avec celles des thermocouples

Caractéristique	Sonde à résistance	Thermocouple
Gamme de fonctionnement	0 °C à 600 °C recommandé en dessous de 400 °C	0 °C à 1 100 °C (métaux courants) 0 °C à 1 700 °C (métaux nobles)
Exactitude	Excellente	Moyenne
Stabilité	Excellente	Correcte
Reproductibilité	Excellente	Bonne
Linearité	Bonne	Correcte
Temps de réponse	Lent	Moyen à rapide
Sensibilité	Bonne	Faible
Auto échauffement	Lent	Aucun
Type de montage	Configuration 3 ou 4 fils	2 fils Câbles prolongateur et compensateur spécifiques
Compensation	Non	Soudure froide

Pour les conditions nucléaires, les sondes à résistance ont de meilleures caractéristiques que les thermocouples, sauf pour ce qui concerne la gamme de température qui est plus étendue pour les thermocouples.

Pour la mesure de la température des éléments combustibles ou pour la surveillance post accidentelle on préfère les thermocouples.

6 Caractéristiques des capteurs de température

6.1 Généralités

Cet article traite des caractéristiques des capteurs de température importantes pour les applications en cœur. Les capteurs qu'on considère peuvent être soit des thermocouples gainés soit des sondes à résistance.

Le choix du type de capteur de température doit être fait en comparant ses caractéristiques avec les conditions de fonctionnement et les exigences à satisfaire. Pour choisir un type de capteur de température on doit prendre en compte les normes génériques:

- CEI 60751 pour les sondes à résistance;
- CEI 60584 série pour les thermocouples.

6.2 Installation

6.2.1 Doigt de gant

Un capteur de température, que ce soit une sonde à résistance ou un thermocouple, peut être utilisé en contact direct avec le matériau dont on veut mesurer la température ou à l'intérieur d'un doigt de gant pour le protéger des conditions environnementales.

Généralement, pour les applications nucléaires les capteurs de température sont installés à l'intérieur d'un doigt de gant à des fins de protection mécanique. Les conséquences en sont:

- une inertie thermique plus grande qui allonge le temps de réponse;
- des erreurs de mesure possibles dues à la faiblesse du contact thermique entre le capteur et le doigt de gant. Pour éviter ce problème, on utilise un ressort pour assurer un bon contact.

Les caractéristiques doivent être définies pour un capteur équipé de son doigt de gant.

6.2.2 Câbles

Les câbles et leur cheminement sont importants. Les paramètres à prendre en compte pour les câbles dépendent des capteurs de température.

Pour les applications nucléaires, les matériaux d'isolation des câbles doivent être de nature minérale pour résister aux conditions d'environnement.

Pour les mesures sur le circuit primaire, le cheminement des câbles doit être conçu pour éviter les interférences électromagnétiques.

6.3 Caractéristiques fonctionnelles

6.3.1 Sensibilité

La sensibilité des capteurs de température est imposée par le comportement physique de ses matériaux en fonction de la température. La sensibilité est définie par des normes pour chaque type de capteur.

6.3.2 Temps de réponse

Pour les applications nucléaires le temps de réponse peut être crucial.

Le temps de réponse du capteur (définition et valeur) doit être spécifié et acceptable pour l'application envisagée.

Un des facteurs déterminant du temps de réponse est le produit de la capacité thermique du capteur par la vitesse de diffusion de la chaleur dans les matériaux.

Il convient de considérer ensemble le temps de réponse, la fiabilité et l'exactitude, par exemple le temps de réponse des thermocouples peut être réduit en limitant le diamètre de la jonction chaude de l'ensemble. Par contre, ceci peut avoir un impact sur la fiabilité.

Suivant les exigences fonctionnelles, trois types de capteurs peuvent être distingués en fonction de leur temps de réponse:

- capteurs rapides (temps de réponse habituellement en dessous de 1 s);
- capteurs semi-rapides (temps de réponse entre 1 s et 5 s);
- capteurs lents (temps de réponse habituellement supérieur à 5 s).

6.3.3 Linéarité

La réponse de l'élément sensible du capteur de température est donnée dans des tableaux fournis dans des normes. Une sonde à résistance est pratiquement linéaire, mais pas un thermocouple qui nécessite qu'une conversion particulière soit faite par un système électronique de façon à linéariser la réponse en fonction de la température.

6.4 Exactitude des mesures de température

L'exactitude requise doit être déterminée en tenant compte de la perturbation créée par l'instrument de mesure. On doit faire la distinction entre l'incertitude liée aux mesures des températures absolues et celle liée aux mesures de différences de température.

Les conséquences des dégradations, et en particulier la diminution de l'isolement, doivent être tolérables. Pour cela il convient de disposer sur site de dispositifs d'étalonnage, mais la façon la plus courante consiste à surveiller les facteurs susceptibles d'amener à une perte d'exactitude.

Ces facteurs sont:

- la détérioration du capteur par suite d'exposition prolongée aux hautes températures;
- la dégradation due aux rayonnements;
- la perte d'isolement due à une détérioration mécanique; et,
- la dérive de l'instrument de mesure.

Pour étalonner un groupe de capteurs sur site, il convient de conserver des enregistrements de tous les capteurs du groupe pour les différentes conditions de fonctionnement.

6.5 Caractéristiques mécaniques

a) Dimensions

Les dimensions et les tolérances du capteur et du câble de raccordement en cœur doivent être spécifiées. Elles comprennent les dimensions extérieures du câble et du capteur, les épaisseurs de la gaine et des conducteurs ainsi que les caractéristiques de flexibilité (nombre de courbures, rayons permis, etc.) se rapportant à l'utilisation envisagée. Ces explications peuvent être complétées par un croquis coté. La taille des grains des matériaux des conducteurs peut aussi avoir de l'importance.

b) Matériaux de structure

Les principaux matériaux de structure du capteur (composants métalliques et isolants) doivent être identifiés et garantis par le fournisseur. Il faut aussi fournir des renseignements concernant les éléments des principales impuretés, lorsque de tels éléments risquent de créer des difficultés par activation neutronique. Ces éléments pourraient être responsables d'une radioactivité rendant les manipulations difficiles, entraîner une défaillance prématurée, ou fausser les mesures en cas de transmutation.

c) Chocs et vibrations

Les capteurs peuvent être sujets à des défaillances dues à la fatigue ou à des effets similaires lorsqu'ils sont soumis à des chocs ou à des vibrations d'origine mécanique ou sismique, et des essais peuvent être effectués à la demande de l'utilisateur pour déterminer l'influence de ces phénomènes. La tenue requise de l'ensemble aux chocs et aux vibrations dépend des objectifs à atteindre en terme de sûreté et d'exploitation (disponibilité). Les limites relatives aux exigences de sûreté doivent être identifiées en fonction de la classe de sûreté de la fonction pour laquelle l'ensemble intégrant les capteurs est employé, voir la CEI 61226. Il convient d'identifier en fonction des contraintes et des objectifs d'exploitation les limites requises liées à celle ci.

d) Montage du câble et du capteur

Les câbles et les capteurs sont potentiellement sujets à des défaillances dues à des montages inadéquats. Les méthodes de montage, le matériel et l'espacement des câbles, leur fixation, etc., doivent être conçus avec des marges de résistance mécanique suffisantes. La

conception des matériels doit tenir compte des vibrations, de la dilatation thermique et des mouvements lors d'un séisme.

e) Intégrité des gaines

Les câbles et les capteurs sont sujets à des défaillances à cause de très petites imperfections de la gaine, et en particulier des soudures et des brasures. On doit examiner la nécessité d'effectuer des essais spéciaux pour vérifier l'intégrité des gaines et détecter les causes potentielles de dégradation.

f) Compatibilité

La compatibilité chimique, physique et électrique entre la gaine du capteur (y compris les soudures et brasures) et tous les autres matériaux en cœur devrait être démontrée par analyse ou par des essais. En plus, lors du choix des matériaux on devra examiner l'effet des dégradations sur les autres composants du réacteur suite à la rupture d'un capteur en service.

g) Finition du capteur

La finition et la propreté de la surface du capteur et de la gaine des câbles sont importantes. Les procédures de nettoyage employées par le fabricant devront être spécifiées et vérifiées, la protection du capteur depuis sa fabrication jusqu'à son installation devra être vérifiée et compatible avec les conditions de service. Il convient également de spécifier l'état de surface et le traitement thermique de la gaine extérieure du capteur et de celle des câbles.

7 Conception du système de mesure de température

7.1 Exigences générales

7.1.1 Généralités

Cet article concerne les mesures de température sur le circuit primaire (température entrée et sortie cœur, température pressuriseur) ou celles faites directement dans le cœur. Les autres mesures de température ne sont pas spécifiques aux applications nucléaires et relèvent des normes industrielles courantes.

Il convient de concevoir un système de mesure de température en fonctions des conditions et des exigences qui s'appliquent au capteur lui-même et à l'ensemble des éléments de la chaîne de mesure, y compris les câbles et les connecteurs.

Il convient que le concepteur du système utilisant un capteur avec son câble évalue les conditions d'utilisation particulières à l'application.

7.1.2 Conditions d'environnement d'ambiance

La conception système doit évaluer les effets de l'environnement (température, atmosphère, doses et débits de dose) sur les matériaux et sur l'exactitude de l'appareil pour l'application envisagée.

Les capteurs de température ne doivent pas modifier, de façon inacceptable, la température à mesurer, ni perturber le fonctionnement du réacteur. Ainsi il convient qu'un thermocouple destiné au combustible ne perturbe pas l'écoulement du réfrigérant autour de l'élément combustible sur lequel s'effectue la mesure, ni autour des éléments combustibles voisins. Il convient d'obtenir une mesure suffisamment représentative de la température à mesurer. A titre d'exemple, il n'est pas possible de mesurer correctement la température du réfrigérant sans avoir une bonne homogénéisation.

7.1.3 Classement

Les fonctions de système de mesure de la température doivent être classées conformément à la norme CEI 61226 et le système doit satisfaire les exigences de la norme CEI 61513.

Un système de mesure de la température important pour la sûreté doit intégrer des redondances lorsque nécessaire pour satisfaire le critère de défaillance unique. Il peut aussi inclure des redondances pour améliorer la fiabilité.

7.1.4 Performances

Le système comprenant le capteur de température, son montage et, pour les thermocouples, la jonction de référence, doit être défini, pour l'application envisagée, en terme d'exactitude et de temps de réponse en fonctionnement normal, pendant et après un accident.

Le concepteur doit prendre en compte les exigences liées à l'exactitude et au temps de réponse pour chaque type de mesure de la température, et déterminer celles-ci à partir des exigences de sûreté, de performances, de conduite ou de surveillance. Lorsque des erreurs significatives ne peuvent pas être évitées il peut être nécessaire d'étalonner en simulant les conditions de mesure et appliquer un facteur de correction. Pour améliorer l'exactitude, différents moyens sont disponibles, tels que l'utilisation d'écrans contre les rayonnements thermiques.

Une source de tension en série avec la résistance du thermocouple est un circuit équivalent à celui d'un thermocouple. Comme la résistance de la boucle peut être significative (jusqu'à environ 200 Ω pour un thermocouple de type K), il convient que le concepteur l'évalue en fonction de l'impédance du système de mesure et des erreurs de mesure tolérées.

7.2 Installation sur site

7.2.1 Conditions d'environnement et exploitation

L'influence possible de l'instrumentation en cœur sur les caractéristiques de fonctionnement du réacteur doit être soigneusement évaluée et doit rester dans des limites acceptables. Cette évaluation doit tenir compte en particulier, du transitoire maximal de réactivité pouvant être causés par un mauvais fonctionnement possible du matériel, de la perturbation de l'écoulement du réfrigérant en conditions normales ou anormales, de la perturbation éventuelle introduite par le matériel sur l'exécution des actions de sûreté, ou de tout autre défaillance susceptible de nuire à l'intégrité de l'enveloppe primaire.

Il doit être tenu compte des conséquences possibles de la détérioration de la gaine d'un câble, entraînant la pénétration de matériau isolant dans le réfrigérant du réacteur ou de la fuite de réfrigérant du réacteur le long du câble ou par une traversée de câble.

Ceci doit aussi couvrir les procédures de remplacement des équipements en cœur. Il convient d'accorder la préférence à la procédure garantissant la meilleure disponibilité de l'installation. L'activité bêta et gamma à vie longue, produite par l'activation neutronique dans l'équipement en cœur, entraîne généralement des problèmes de radioprotection pour la manutention. Il convient que ces effets soient soigneusement pris en compte et minimisés dans la mesure du possible, grâce au choix judicieux des matériaux de structure et de la conception mécanique de l'installation. De même, il convient d'étudier les mécanismes, etc., devant être manipulés pendant les périodes de maintenance.

Les matériaux utilisés pour les parties du système situées dans le cœur doivent être adaptés aux fonctions à réaliser dans les conditions d'ambiance prévalent dans le cœur. En particulier, il convient d'évaluer l'influence des rayonnements gamma et neutroniques à long terme et des cycles de variation de température par des essais sur des ensembles prototype ou par l'interprétation d'autres données expérimentales. Les effets des rayonnements sur le capteur et ses câbles doivent être pris en compte lors de la conception. Il est nécessaire de

savoir si les rayonnements modifient la caractéristique d'étalonnage ou endommagent l'appareil et si ces effets sont à court ou à long terme.

La valeur de l'activité résiduelle doit être également connue, pour des raisons de manipulation. Les doses et les débits de dose maximaux à l'endroit de la mesure doivent être spécifiés. La FEM d'un thermocouple étant dû à l'effet Seebeck lié au gradient de température le long des fils conducteurs, il en résulte que l'irradiation totale, de même que la dose reçue par la jonction de mesure, peut conduire à une perte de l'étalonnage.

Les moyens employés pour immobiliser le capteur de température au point de mesure et pour guider le câble jusqu'à son passage dans le réacteur, doivent être compatibles avec l'environnement dans lequel ils sont utilisés.

La compatibilité chimique avec l'environnement, la dilatation différentielle et le bon fonctionnement lors des chocs et des vibrations mécaniques ou sismiques sont particulièrement importants.

Les matériaux des sondes à résistance doivent être sélectionnés pour résister aux conditions environnementales les plus sévères, lorsque les matériaux sont réputés à la fin de leur vie opérationnelle mais qu'ils restent dans les critères électriques spécifiés.

Le système doit être conçu de façon à faciliter, si nécessaire, les essais fonctionnels des composants cœur, réacteur en marche. Des composants de rechange installés peuvent par exemple être étalonnés par rapport à des appareils opérationnels. Les essais de continuité et d'isolement doivent être possibles.

Il convient de choisir, pour un ensemble en cœur, une durée de vie utile de telle manière qu'un remplacement puisse être effectué sans impact sur la disponibilité, ni sur la sûreté de la centrale.

L'effet de la chaleur produite par l'absorption de rayonnements doit être pris en compte dans la conception du système.

7.2.2 Mode de fonctionnement

Les conditions d'installation et de fonctionnement du capteur et du câble doivent être spécifiées. L'utilisation du signal et le mode de raccordement du capteur à l'ensemble de mesure doivent être étudiés (entre autres le blindage, la mise à la terre du capteur). Les connexions sont à considérer avec soin compte tenu de l'effet des perturbations électromagnétiques.

La durée de vie utile prévue pour le capteur et pour son câble doit être compatible avec l'application proposée. Il est reconnu que des effets liés au vieillissement peuvent apparaître. Leur importance et les méthodes permettant de déterminer la durée de vie utile dépendent de l'application considérée.

La norme CEI 62342 fournit des recommandations pour prendre en compte le vieillissement des capteurs de température.

7.2.3 Etalonnage

Une méthode d'étalonnage sur site consiste à rendre amovible un capteur du groupe, afin de le remplacer par un capteur récemment étalonné. Cela entraîne l'installation d'un tube de guidage et la nécessité de prévoir à la conception des repères de positionnement des capteurs. Lorsque des mesures de température particulièrement précises sont nécessaires, les capteurs peuvent être rendus amovibles afin de pouvoir placer des unités étalonnées à intervalles de temps plus ou moins longs selon les conditions de température et d'irradiation.

Les conditions de température cœur doivent être stables durant l'étalonnage. Des détails concernant les méthodes d'étalonnage sont fournis dans la norme CEI 62385.

7.2.4 Etendue de mesure et exactitude

L'étendue de mesure (augmentée d'une marge pour dépassement des températures) pour une exactitude donnée doit être spécifiée en tenant compte des limitations de l'ensemble de mesure. Il peut également être nécessaire de spécifier la température qui limite la vie utile ainsi que la distribution de température prévue le long du capteur et de son câble.

7.2.5 Conditions électriques

La résistance d'isolement minimale du capteur et des câbles doit être spécifiée à la température ambiante ainsi que sous les conditions de fonctionnement les plus sévères. Cette résistance peut dépendre de la tension d'essai dont le maximum doit être spécifié; la résistance de boucle des conducteurs peut être également importante.

Il convient de vérifier la résistance d'isolement d'un thermocouple équipé d'une gaine avec un isolant minéral avant son installation, lors des principaux arrêts et en cas de défaillance si celle-ci risque d'être inférieure à 1 M Ω .

Il peut exister des résistances de boucle de thermocouple allant jusqu'à 200 Ω , et il convient que le concepteur prenne en compte une bande de tolérance pour l'essai.

Les effets de perturbations électromagnétiques et autres sources de bruit de fond telles que la microphonie du câble et les signaux dus à une irradiation concomitante (effet "collectron") ne doivent pas provoquer d'erreur inacceptable. Les effets « collectrons » dans le cas des thermocouples peuvent produire de hautes tensions au niveau des capacités des thermocouples par rapport à la terre, si la résistance d'isolement est élevée. Il convient que le système de mesure soit conçu pour supporter ou décharger de telles tensions.

En cas d'utilisation de contacts mobiles pour raccorder les capteurs de température, ces contacts doivent être conçus pour ne pas introduire d'erreurs significatives en condition de température stable ou dynamique. Les connecteurs de câbles doivent être d'une qualité compatible avec l'application envisagée.

Le cheminement des câbles doit être conçu pour ne pas être endommagés par des engins en mouvement tels que la machine de rechargement. Si les mesures sont importantes pour la sûreté, le cheminement des câbles doit aussi remplir des exigences de séparation pour satisfaire au critère de défaillance unique et éviter les défaillances de cause commune. Certaines mesures peuvent être utilisées pour la surveillance post accidentelle, et celles-ci doivent aussi satisfaire des exigences de séparation pour éviter des défaillances de cause commune. Concernant le cheminement des câbles et la séparation, voir la norme CEI 60709.

Des fonctionnements de réacteur de types différents peuvent rendre nécessaire des accès à, des débranchements ou des remplacements de thermocouples surveillant les températures des éléments combustibles ou des sorties de canaux combustibles. Ceci est particulièrement important durant les opérations de rechargement. Il convient d'être particulièrement soigneux pour la conception des moyens de débranchement ou de remplacement en ce qui concerne l'exposition des opérateurs aux rayonnements, et pour les dispositifs d'essai des thermocouples.

Des boucles peuvent être nécessaires pour éviter des tensions mécaniques sur les câbles lorsque certaines parties de la structure se déplacent les unes par rapport aux autres sous l'effet de la température. Il convient de prendre des photographies de l'installation pour aider à résoudre les difficultés qui peuvent survenir après que l'enveloppe primaire ait été fermée.

On doit spécifier la méthode utilisée pour identifier les capteurs et leurs câbles pendant la construction du réacteur.

8 Exigences relatives aux essais

8.1 Généralités

Les exigences d'essai suivantes sont particulièrement importantes pour les utilisations en réacteur et il convient de faire apparaître ces exigences dans toute commande et dans tout programme de fabrication et programme d'essai. La prise en considération de ce point peut conduire à des prescriptions plus difficiles à respecter que celles normalement utilisées dans l'industrie non nucléaire. Il convient de prendre en compte les méthodes d'essai normalisées pour les sondes à résistance décrites dans la norme CEI 60751 comme des recommandations pour développer un programme d'essai en production.

8.2 Essais de présérie

- a) Des essais de présérie doivent être effectués pour démontrer que le capteur de mesure de température proposé satisfait aux spécifications. Ces essais peuvent englober des expériences sur les effets des vibrations et des chocs et sur la détérioration par les rayonnements.
- b) Il convient d'effectuer aussi des essais sur prototypes sur des composants individuels du système tels que les connecteurs, sur le mode de raccordement aux capteurs, sur la fiabilité de la jonction de mesure pour les thermocouples, sur les effets de la corrosion, etc.
- c) Le fabricant doit utiliser des méthodes adaptées d'assurance qualité et il convient qu'il ait les moyens de minimiser les conséquences découlant des difficultés imprévues de production et de non-conformité aux essais de série.

8.3 Procédé de fabrication et essais de série

8.3.1 Généralités

Pour spécifier un programme de production et un planning d'essais de fabrication concernant les thermocouples gainés et les sondes à résistance, il doit être tenu compte des facteurs suivants:

- a) Les matériaux utilisés dans la fabrication doivent être agréés. En particulier la surface des composants doit être exempte de contamination par des poisons nucléaires tels que le bore, le cadmium ou le gadolinium, de substances susceptibles de provoquer la corrosion et de produits chimiquement actifs tels que le chlore. Les lubrifiants et autres produits nocifs inacceptables doivent être exclus.

Les matériaux utilisés pour fabriquer les gaines du câble et du capteur doivent être conformes aux spécifications et être exempts de défauts gênants susceptibles d'écourter la durée de vie utile du capteur. Les matériaux isolants doivent avoir une composition susceptible d'assurer une résistance d'isolement élevée, une bonne tenue à la corrosion et aux rayonnements pendant toute la durée de vie du capteur.

- b) Les câbles doivent avoir fait l'objet de traitements et d'essais appropriés. Cela peut inclure des essais ou des preuves de conformité des matériaux relatifs:
 - au traitement thermique assurant un recuit et une taille de grain appropriés;
 - à la vérification de la configuration des conducteurs;
 - à l'intégrité de la gaine assurant l'absence de trous;
 - à la vérification de la ductilité de la gaine et du conducteur;
 - à la bonne résistance du conducteur et de la résistance d'isolement de l'isolant;
 - à la résistance à la corrosion;
 - à la garantie que la gaine a une épaisseur uniforme et suffisante et qu'il n'y a pas de défaut potentiel.

La méthode de mesure des résistances d'isolement doit être spécifiée.

- c) Toutes les gaines de capteurs et de câbles doivent être nettoyées par un procédé agréé. Après nettoyage, leur intégrité doit être vérifiée par une inspection portant sur l'état de surface et l'étanchéité.
- d) Chaque capteur terminé doit être étalonné et un certificat d'essais fourni.
- e) Chaque capteur terminé, câble compris, doit porter une étiquette mentionnant le type, le numéro de série, la longueur du câble, ainsi que le nom du fabricant du câble. Il doit être livré dans un conteneur agréé, destiné à le protéger pendant le transport, le stockage et la manutention sur le site du réacteur.
- f) Le fabricant et l'utilisateur doivent convenir des documents à fournir, tels que les certificats concernant le contrôle des essais, etc. Il convient que cette documentation permette de s'assurer de la conformité à cette norme et aux autres normes applicables ou ayant fait l'objet d'un accord qui concernent les matériaux et leur pureté.
- g) Les câbles à isolant minéral peuvent être endommagés par l'application de tensions d'essai trop élevées. La tension d'essai maximale à utiliser pour les mesures de résistance d'isolement doit être spécifiée.

8.3.2 Facteurs applicables aux thermocouples

- a) Les thermocouples doivent être réalisés à l'aide de conducteurs agréés et satisfaisant aux exigences du point a) du paragraphe 8.3.1. Les matériaux des conducteurs doivent être conformes aux normes concernant les thermocouples et il convient que le fabricant certifie à l'utilisateur la conformité à ces exigences. Il convient que des vérifications portent sur la FEM thermoélectrique des conducteurs.
- b) La soudure des jonctions et l'étanchéité des gaines de câbles doivent être vérifiées par un procédé agréé. Isolement électrique: sur tous les matériels, il convient d'effectuer des essais radiographiques et des essais de résistance de la boucle du conducteur, y compris des radiographies des jonctions de mesure. Les essais concernant l'état métallographique, tels que les examens métallographiques ou des essais de ductilité et de résistance à la corrosion, doivent être effectués sur un nombre réduit d'échantillons.
- c) Le thermocouple doit être scellé aux deux extrémités, avant expédition par le fabricant.

8.3.3 Facteurs applicables aux sondes à résistance

- a) Etant donné que les sondes à résistance sont fabriquées avec des composants relativement nombreux, le contrôle de la qualité pendant le montage est important. Les composants doivent être choisis avec soin.
- b) Les sondes à résistance sont vulnérables aux chocs et aux vibrations et des essais adaptés doivent être inclus dans le programme de fabrication et être effectués sur des échantillons.

8.4 Essais sur le site

La phase d'installation et les essais terminaux doivent comprendre au moins les procédures suivantes:

- a) Chaque capteur doit être examiné soigneusement pour déceler d'éventuelles détériorations dues au transport.
- b) La résistance de la boucle et la résistance d'isolement du transducteur doivent être mesurées en appliquant les tensions spécifiées avant l'installation et comparées à celles qui sont données par le certificat d'essai.
- c) L'essai b) doit être répété après installation dans l'enveloppe primaire du réacteur. Cet essai doit être réalisé aussi près que possible du capteur, à partir d'une boîte de dérivation placée à l'extérieur de l'enveloppe et située près du capteur.
- d) La résistance totale de la boucle et la résistance d'isolement doivent être mesurées à partir de la dernière boîte de dérivation avant l'instrument de mesure.
- e) Les valeurs relevées lors des essais b), c) et d), ci dessus doivent être enregistrés en vue de leur utilisation ultérieure pour l'analyse des pannes.
- f) On doit vérifier et confirmer sur site les performances du capteur.

NOTE Les essais de résistance d'isolement ne peuvent être réalisés sur des thermocouples à jonction non isolée.

9 Essais de qualification

9.1 Principes

L'objectif du processus de qualification est de démontrer l'aptitude des capteurs à fonctionner en conditions extrêmes pour lesquelles ils sont utilisés et de résister à certains phénomènes dangereux particuliers y compris des séismes. Le processus de qualification est défini dans les normes CEI 60780 et CEI 60980. Il convient que celui-ci repose sur des essais sur prototypes ou sur des capteurs choisis au hasard dans des lots de production. Il convient que ces essais soient combinés avec des essais réalisés sur les composants séparés ou sur des capteurs comparables. Il convient de rajouter une analyse et un argumentaire relatifs à des essais réalisés précédemment sur des capteurs semblables pour démontrer les performances et la qualification.

9.2 Séquence d'essais sur un capteur

La séquence d'essais est définie en fonction des conditions d'environnement et de fonctionnement du capteur.

Chaque capteur peut fonctionner dans son doigt de gant. L'influence potentielle de l'ensemble de mesure doit être prise en compte par les essais.

Avant de dérouler la séquence d'essais, les caractéristiques du capteur telles que définies par les essais usine sont mesurées. Après avoir déroulé la séquence d'essais ces caractéristiques sont mesurées à nouveau pour confirmer que le capteur fonctionne encore. Durant certains essais, le signal est enregistré pour vérifier les performances fonctionnelles.

9.3 Essais pour les conditions d'environnement

9.3.1 Essais de température

Le capteur de température peut avoir fait l'objet d'essais de type à une température appropriée maximale, et il peut être accepté sur cette base. Cependant, lorsque les capteurs participent à la réalisation de fonctions de catégorie A, on doit déterminer les températures maximales d'essais de qualification en fonction des conditions extrêmes et des conditions de défaillance. Dans certains cas, il convient de réaliser les essais avec l'ensemble de mesure présent autour du capteur. La procédure doit définir la température maximale. Durant l'essai, le signal doit être enregistré pour détecter tout fonctionnement anormal.

9.3.2 Essais de pression

Des essais ayant fait l'objet d'un accord portant sur les caractéristiques du capteur doivent être réalisés avant et après toute simulation de mise en pression et les résultats de ces essais doivent être invariants dans les limites spécifiées.

9.3.3 Autres essais

Il convient de réaliser des essais particuliers ou complémentaires sur des prototypes en fonction des conditions particulières de fonctionnement.

9.4 Essais sismiques

Lorsqu'un capteur, avec son ensemble de mesure, est utilisé pour réaliser des fonctions de sûreté (catégorie A ou dans certains cas catégorie B conformément à la CEI 61226) il doit résister à des événements sismiques. La procédure d'essai, les conditions et les critères sont définis par la norme CEI 60980.

Le signal du capteur doit faire l'objet d'une surveillance durant l'essai de façon à mettre en évidence toute défaillance ou perturbation anormale.

Bibliographie

CEI 60050-393, *Vocabulaire Electrotechnique International – Partie 393: Instrumentation nucléaire – Phénomènes physiques et notions fondamentales*

CEI 60050-394, *Vocabulaire Électrotechnique International – Partie 394: Instrumentation nucléaire – Instruments, systèmes, équipements et détecteurs*

Glossaire de Sûreté de l'AIEA: Edition 2007

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