

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Fuel cell technologies –
Part 2: Fuel cell modules**

**Technologies des piles à combustible –
Partie 2: Modules à piles à combustible**





THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2012 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 Varembé
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

Useful links:

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables you to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...).

It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

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

A propos de 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.

Liens utiles:

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

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...).

Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

Just Published CEI - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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



IEC 62282-2

Edition 2.0 2012-03

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Fuel cell technologies –
Part 2: Fuel cell modules**

**Technologies des piles à combustible –
Partie 2: Modules à piles à combustible**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX



ICS 27.070

ISBN 978-2-88912-002-4

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	8
3 Terms and definitions	9
4 Requirements	12
4.1 General safety strategy	12
4.2 Design requirements	14
4.2.1 General	14
4.2.2 Behaviour at normal and abnormal operating conditions	14
4.2.3 Leakage	14
4.2.4 Pressurized operation.....	14
4.2.5 Fire and ignition.....	15
4.2.6 Safeguarding	16
4.2.7 Piping and fittings	16
4.2.8 Electrical components	17
4.2.9 Terminals and electrical connections	17
4.2.10 Live parts	18
4.2.11 Insulating materials, dielectric strength.....	18
4.2.12 Bonding	18
4.2.13 Shock and vibration	18
5 Type tests	19
5.1 General.....	19
5.2 Shock and vibration test	19
5.3 Gas leakage test	19
5.4 Normal operation.....	20
5.5 Allowable working pressure test	21
5.6 Pressure withstanding test of cooling system	21
5.7 Continuous and short-time electrical rating.....	21
5.8 Overpressure test.....	21
5.9 Dielectric strength test.....	22
5.10 Differential pressure test	23
5.11 Gas leakage test (repeat)	24
5.12 Normal operation (repeat)	24
5.13 Flammable concentration test.....	24
5.14 Tests of abnormal conditions.....	24
5.14.1 General	24
5.14.2 Fuel starvation test.....	25
5.14.3 Oxygen/oxidant starvation test.....	25
5.14.4 Short-circuit test	25
5.14.5 Lack of cooling/impaired cooling test	25
5.14.6 Crossover monitoring system test.....	26
5.14.7 Freeze/thaw cycle tests	26
6 Routine tests	26
6.1 General.....	26
6.2 Gas-tightness test	26

6.3	Dielectric strength withstand test	27
7	Markings and instructions	27
7.1	Nameplate	27
7.2	Marking	27
7.3	Warning label	27
7.4	Documentation	27
7.4.1	General	27
7.4.2	Installation manual	29
7.4.3	Installation diagram	29
7.4.4	Operation manual	30
7.4.5	Maintenance manual	30
7.4.6	Parts list	30
Annex A (informative)	Additional information for the performance and evaluation of the tests	32
Annex B (informative)	List of notes concerning particular conditions in certain countries	38
Bibliography		39
Figure 1	Fuel cell system components and scope of standard	8
Table 1	Dielectric strength test voltages (derived from EN 50178)	23
Table A.1	Viscosity of gases at one atmosphere	35

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

FUEL CELL TECHNOLOGIES –**Part 2: Fuel cell modules****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 62282-2 has been prepared by IEC technical committee 105: Fuel cell technologies.

This second edition cancels and replaces the first edition, published in 2004, its amendment 1 (2007) and constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- inclusion of definitions for hazards and hazardous locations based on the IEC 60079 series;
- the general safety strategy is modified to reflect the needs for different application standards. The modifications are in line with similar modifications made to IEC 62282-3-100;
- the electrical components clause is modified to reflect the needs for different application standards. The modifications are in line with similar modifications made to IEC 62282-3-100;

- the marking and instructions have been enlarged to provide the system integrator with the necessary information.

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

FDIS	Report on voting
105/378/FDIS	105/389/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.

A list of all the parts in the IEC 62282 series, published under the general title *Fuel cell technologies*, can be found on the IEC website.

The reader's attention is drawn to the fact that Annex B lists all of the "in-some-country" clauses on differing practices of a less permanent nature relating to the subject of this standard.

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.

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

Fuel cell modules are electrochemical devices which convert continuously supplied fuel, such as hydrogen or hydrogen rich gases, alcohols, hydrocarbons and oxidants to d.c. power, heat, water and other by-products.

Fuel cell modules are sub-assemblies that are integrated into end-use products incorporating one or more fuel cell stacks and, if applicable, additional components.

FUEL CELL TECHNOLOGIES –

Part 2: Fuel cell modules

1 Scope

This part of IEC 62282 provides the minimum requirements for safety and performance of fuel cell modules and applies to fuel cell modules with the following electrolyte chemistry:

- alkaline;
- polymer electrolyte (including direct methanol fuel cells)¹;
- phosphoric acid;
- molten carbonate;
- solid oxide;
- aqueous solution of salts.

Fuel cell modules can be provided with or without an enclosure and can be operated at significant pressurization levels or close to ambient pressure.

This standard deals with conditions that can yield hazards to persons and cause damage outside the fuel cell modules. Protection against damage inside the fuel cell modules is not addressed in this standard, provided it does not lead to hazards outside the module.

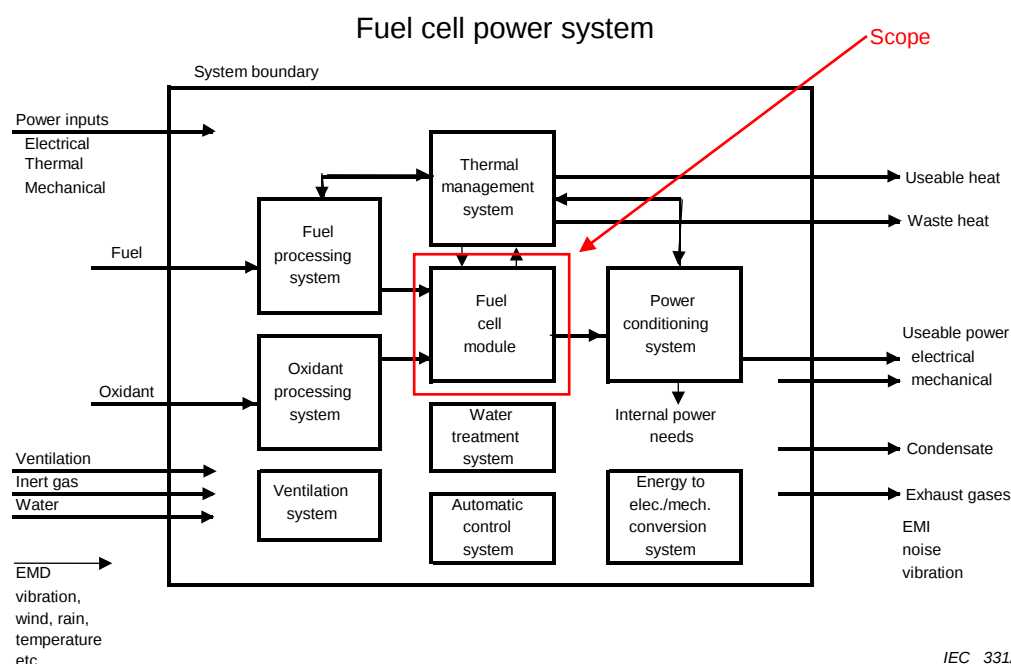
These requirements may be superseded by other standards for equipment containing fuel cell modules as required for particular applications.

This standard does not cover road vehicle applications.

This standard is not intended to limit or inhibit technological advancement. An appliance employing materials or having forms of construction differing from those detailed in the requirements of this standard may be examined and tested according to the purpose of these requirements and, if found to be substantially equivalent, may be considered to comply with this standard.

The fuel cell modules are components of final products. These products require evaluation to appropriate end-product safety requirements.

¹ Also known as proton exchange membrane fuel cell.



Key

EMD electromagnetic disturbance
EMI electromagnetic interference

Figure 1 – Fuel cell system components

This standard covers only up to the d.c. output of the fuel cell module.

This standard does not apply to peripheral devices as illustrated in Figure 1.

This standard does not cover the storage and delivery of fuel and oxidant to the fuel cell module.

2 Normative references

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

IEC 60079 (all parts), *Explosive atmospheres*

IEC 60079-10 (all Parts 10), *Explosive atmospheres – Part 10: Classification of areas*

IEC 60204-1, *Safety of machinery – Electrical equipment of machines – Part 1: General requirements*

IEC 60335-1, *Household and similar electrical appliances – Safety – Part 1: General requirements*

IEC 60352 (all parts), *Solderless connections*

IEC 60512-15 (all parts), *Connectors for electronic equipment – Tests and measurements – Part 15: Connector tests (mechanical)*

IEC 60512-16 (all parts) *Connectors for electronic equipment – Tests and measurements – Part 16: Mechanical tests on contacts and terminations*

IEC 60529, *Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*

IEC 60617, *Graphical symbols for diagrams*

IEC 60695 (all parts), *Fire hazard testing*

IEC 60730-1, *Automatic electrical controls for household and similar use – Part 1: General requirements*

IEC 60950-1, *Information technology equipment – Safety – Part 1: General requirements*

IEC 61508 (all parts), *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*

IEC 62040-1, *Uninterruptible power systems (UPS) – Part 1: General and safety requirements for UPS*

IEC 62061, *Safety of machinery – Functional safety of safety-related electrical, electronic and programmable electronic control systems*

ISO 13849-1, *Safety of machinery – Safety related parts of control systems – Part 1: General principles for design*

ISO 23550, *Safety and control devices for gas burners and gas-burning appliances – General requirements*

EN 50178, *Electronic equipment for use in power installations*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

3.1

acceptance test

contractual test to prove to the customer that the item meets certain conditions of its specification

[SOURCE: IEC 60050-151:2001, 151-16-23] [1]²

3.2

allowable differential working pressure

maximum pressure difference between the anode and cathode side specified by the manufacturer which the fuel cell module can withstand without any damage or permanent loss of functional properties

² References in square brackets refer to the bibliography.

3.3

allowable working pressure

maximum gauge pressure specified by the manufacturer which the fuel cell module can withstand without any damage or permanent loss of functional properties

Note 1 to entry: For fuel cell modules incorporating pressure relief devices, this is normally used to define the threshold of the set pressure.

3.4

ambient temperature

temperature of the medium surrounding a device, equipment or installation which may affect the performance of the device, equipment or installation

3.5

conditioning

(related to cells/stacks) preliminary step that is required to properly operate a fuel cell module (3.8) and that is realized following a protocol specified by the manufacturer

Note 1 to entry: The conditioning may include reversible and/or irreversible processes depending on the cell technology.

3.6

fuel cell

electrochemical device that converts the chemical energy of a fuel and an oxidant to electrical energy (DC power), heat and reaction products

Note 1 to entry: The fuel and oxidant are typically stored outside the fuel cell and transferred into the fuel cell as they are consumed.

3.7

fuel cell stack

assembly of cells, separators, cooling plates, manifolds and a supporting structure that electrochemically converts, typically, hydrogen rich gas and air reactants to DC power, heat and other reaction products

[SOURCE: IEC 62282-1:2010, 3.50] [2]

3.8

fuel cell module

assembly incorporating one or more fuel cell stacks and other main and, if applicable, additional components, which is intended to be integrated into a power system

Note 1 to entry: A fuel cell module is comprised of the following main components: one or more fuel cell stack(s), piping system for conveying fuels, oxidants and exhausts, electrical connections for the power delivered by the stack(s) and means for monitoring and/or control. Additionally, a fuel cell module may comprise: means for conveying additional fluids (e.g. cooling media, inert gas), means for detecting normal and/or abnormal operating conditions, enclosures or pressure vessels and module ventilation systems.

3.9

rated current

maximum continuous electric current as specified by the fuel cell module manufacturer at which the fuel cell module has been designed to operate

3.10

crossover

cross leakage

leakage between the fuel side and the oxidant side, of a fuel cell, in either direction, generally through the electrolyte

3.11

gas leakage

sum of all gases leaving the fuel cell module except the intended exhaust gases

Note 1 to entry: Gas leakage may occur from

- the fuel cell stack;
- associated pressure relief devices;
- other gas ducting and flow controlling components.

3.12

hazard

potential source of harm in the form of physical injury to the health of people, property or the environment

3.13

hazardous area

classified area

area or space where combustible dust, ignitable fibres, or flammable, volatile liquids, gases, vapours or mixtures are or may be present in the air in quantities sufficient to produce explosive or ignitable mixtures

3.14

heat deflection temperature

temperature at which a standard test bar deflects a specified distance under load

Note 1 to entry: It is used to determine short-term heat resistance.

3.15

lower flammability limit

LFL

minimum concentration of fuel in a fuel-air mixture where a combustion can be ignited by an ignition source

Note 1 to entry: A fuel-air mixture is flammable when combustion can be started by an ignition source. The main component is the proportions or composition of the fuel-air mixture. A mixture that has less than a critical amount of fuel, known as the lower flammability limit (LFL) or more than a critical amount of fuel, known as the rich or upper flammability limit (UFL), will not be flammable.

3.16

maximum operating pressure

maximum pressure, specified by the manufacturer of a component or system, at which it is designed to operate continuously

Note 1 to entry: The maximum operating pressure is expressed in Pa.

Note 2 to entry: Includes all normal operation, both steady state and transient.

3.17

minimum voltage

lowest voltage that a fuel cell module is able to produce continuously at its rated power or during its maximum permissible overload conditions, whichever voltage is lower

Note 1 to entry: The minimum voltage is expressed in V.

3.18

natural ventilation

movement of air and its replacement with fresh air due to the effects of wind and/or temperature gradients

3.19

open-circuit voltage

voltage across the terminals of a fuel cell with fuel and oxidant present and in the absence of external current flow

Note 1 to entry: The open-circuit voltage is expressed in V.

3.20

routine test

conformity test made on each individual item during or after manufacture

[SOURCE: IEC 60050-151:2001, 151-16-17]

Note 1 to entry: Not to be confused with "Conformity test" [IEC 60050-151:2001, 151-16-15]: test for conformity evaluation or "Conformity evaluation" [IEC 60050-151:2001, 151-16-14]: systematic examination of the extent to which a product, process or service fulfils specified requirements.

3.21

standard conditions

test or operating conditions that have been predetermined to be the basis of the test in order to have reproducible, comparable sets of test data

3.22

safeguarding

control system actions, based on process parameters, taken to avoid conditions that might be hazardous to personnel or might result in damage to the fuel cell or its surroundings

3.23

safety extra low voltage

SELV

voltage under normal and single fault conditions that do not exceed 30 V r.m.s. or 42,4 V peak/d.c. in dry environments or when wet contact is likely to occur, 15 V r.m.s. or 21,2 V peak/d.c.

3.24

thermal equilibrium conditions

stable temperature conditions indicated by temperature changes of no more than 3 K (5 °F) or 1 % of the absolute operating temperature, whichever is higher between two readings 15 min apart

3.25

thermal stability

stable temperature isothermal conditions

3.26

type test

conformity test made on one or more items representative of the production

[SOURCE: IEC 60050-151:2001, 151-16-16]

Note 1 to entry: Not be confused with "Conformity test" [IEC 60050-151:2001, 151-16-15]: test for conformity evaluation or "Conformity evaluation" [IEC 60050-151:2001, 151-16-14]: systematic examination of the extent to which a product, process or service fulfils specified requirements.

4 Requirements

4.1 General safety strategy

The manufacturer shall perform in written form a risk analysis to ensure that

- a) all reasonably foreseeable hazards, hazardous situations and events throughout the anticipated fuel cell power system's lifetime have been identified (see Annex A for a listing of typical hazards),
- b) the risk for each of these hazards has been estimated from the combination of probability of occurrence of the hazard and of its foreseeable severity,

- c) the two factors which determine each one of the estimated risks (probability and severity) have been eliminated or reduced to a level not exceeding the acceptable risk level, as far as is practically possible, through
- 1) inherently safe design of the construction and its methods, or
 - 2) passive control of energy releases without endangering the surrounding environment (for example, burst disks, release valves, thermal cut-off devices) or by safety related control functions, and
 - 3) for residual risks which could not have been reduced by the measures according to 1) and 2), provision of labels, warnings or requirements of special training shall be given, considering that such measures need to be understood by the persons which are in the area of the hazards.

For functional safety, the required severity level, performance level or the class of control function shall be determined and designed in accordance with e.g.:

- IEC 62061 (respectively ISO 13849-1) for applications according to IEC 60204-1;
- IEC 60730-1 for appliances according to IEC 60335-1;
- IEC 61508 (all parts) for other applications.

For failure mode and effects analysis (FMEA) and fault tree analysis methods, the following standards can be used as guidance:

- IEC 60812 [3];
- SAE J1739 [4];
- IEC 61025 [5].

The assessment shall also cover the following possible risks:

- stack temperature, and
- stack and/or cell voltage,
- pressure of pressurized parts.

Furthermore, care shall be taken to address the following:

- mechanical hazards – sharp surfaces, tripping hazards, moving masses and instability, strength of materials, and liquids or gases under pressure;
- electrical hazards – contact of persons with live parts, short-circuits, high voltage;
- EMC hazards – malfunctions of the fuel cell module when exposed to electromagnetic phenomena or malfunctions of other (nearby) equipment due to electromagnetic emissions from the fuel cell module;
- thermal hazards – hot surfaces, release of high temperature liquids or gases, thermal fatigue;
- fire and explosion hazards – flammable gases or liquids, potential for explosive mixtures during normal or abnormal operating conditions, potential for explosive mixtures during faulted conditions;
- malfunction hazards – unsafe operation due to failures of software, control circuit or protective/safety components or incorrect manufacturing or misoperation;
- material and substance hazards – material deterioration, corrosion, embrittlement, toxic releases;
- waste disposal hazards – disposal of toxic materials, recycling, disposal of flammable liquids or gases;
- environmental hazards – unsafe operation in hot/cold environments, rain, flooding, wind, earthquake, external fire, smoke.

4.2 Design requirements

4.2.1 General

The fuel cell module shall be designed in accordance with a risk assessment performed by the fuel cell module manufacturer. All parts shall be

- a) suitable for the range of temperatures, pressures, flow rates, voltages and currents to which they are subjected during intended usage, and
- b) resistant to the reactions, processes and other conditions to which they are exposed during intended usage.
- c) The quality and thickness of the materials used in the fuel cell module, their fitting elements and terminals and the method of assembling the various parts, shall be such that the constructional and operational characteristics are not significantly altered during a reasonable lifetime and under normal conditions of installation and use. All parts of the fuel cell module shall withstand the mechanical, chemical and thermal conditions to which they may be subjected when the end user product is used normally.

Fuel cell module enclosures shall comply with the requirements given by IEC 60529 to fit into the application system. The fuel cell module shall carry the IP-Code accordingly.

NOTE An IP00 rating indicating non-protected may be appropriate when the end use equipment has a protective enclosure.

4.2.2 Behaviour at normal and abnormal operating conditions

The fuel cell module shall be designed in such a way that it withstands all normal operating conditions as defined by the manufacturer's specification without any damage. Abnormal operating conditions shall be covered according to 4.1.

4.2.3 Leakage

Depending on the design, leakage of combustible gases or liquids may occur (test see 5.3). The gas leakage rate shall be included in the specification document, so that the integrator of the fuel cell system can determine the minimum capacity of the required ventilation system (see 7.4.1, r), purging and ventilation flow rate requirements.

The fault mode "crossover" shall be part of the risk assessment according to 4.1. Measures e. g. "cell voltage monitors" shall be designed according to the relevant standard given in 4.1.

When crossover protection is not included in the fuel cell module, the product documentation shall describe any protective devices or operating procedures that have to be provided by the system integrator.

NOTE For classification of hazardous areas, consider IEC 60079-10.

4.2.4 Pressurized operation

If fuel cell modules include gas-tight and pressurized enclosures, those enclosures shall comply with national regulations.

Pressure operation conditions that could generate hazardous conditions outside of the module shall be identified (see 4.1) and the information conveyed to the system integrator

NOTE The following modules present particular properties:

PEFC modules

Pressure is not a significant design factor for the design of a PEFC (polymer electrolyte fuel cell stack). The dimensioning, choice of material and manufacturing rules of a PEFC stack are based primarily on requirements for sufficient strength, rigidity and stability to meet the static, dynamic, and/or other operational characteristics. For example, a design using coaxial force compression hardware leaks before it breaks.

PAFC modules

The PAFC (phosphoric acid fuel cell) module usually operates under atmospheric pressure.

MCFC modules

For a pressurized operation of a MCFC (molten carbonate fuel cell), the MCFC module is integrated into an MCFC system. This MCFC system provides the housing of the MCFC module and is designed according to the applicable national and international codes and standards for pressurized systems.

A hazard due to pressure associated with an MCFC module can be excluded due to the housing, which is in accordance with the regulations mentioned.

SOFC modules

If pressurized operation of a SOFC (solid oxide fuel cell) is foreseen, the SOFC module is integrated into the SOFC power system. For that application, the SOFC module is enclosed within a pressure vessel designed, manufactured and equipped according to applicable national and international codes and standards for pressurized systems.

4.2.5 Fire and ignition**4.2.5.1 General**

The fuel cell module shall be protected by means (for example, ventilation, gas detectors, controlled oxidation, operating temperatures higher than the auto-ignition temperature, etc.) such that leaking gases from, or inside, the fuel cell module cannot form explosive concentrations.

The design criteria for such means (for example required ventilation rate) shall be provided by the fuel cell module manufacturer. The means shall be provided either by the fuel cell module manufacturer or by the fuel cell system manufacturer. If the fuel cell manufacturer does not provide such means, then he shall provide the design and test criteria for such means (for example required ventilation rate).

Components and materials inside the classified gas flammable atmospheres shall be constructed or shall make use of such materials that propagation of fire and ignition is mitigated. The material flammability shall be such that a sustained fire will not be supported after electrical power and the fuel and oxidant supply have been terminated. This may be demonstrated through the selection of materials meeting V 0, V 1 or V 2 in accordance with the IEC 60695 series.

NOTE The auto-ignition temperatures commonly listed in standards such as IEC 60079-20-1[6] are the minimum temperatures at which a flammable gas mixture may ignite. The actual auto-ignition temperatures can be well above these values depending on the surface geometry, material and the actual gas mixtures. This requirement refers to an auto-ignition temperature that will ignite a flammable gas under all conditions for the chosen materials and geometry.

The requirements of the application standard as given in 4.1 shall be considered concerning "Resistance to heat and fire".

4.2.5.2 Exemptions

Membranes, or other materials within the fuel cell stack volume which comprise less than 10 % of the total fuel cell module mass, are considered to be of limited quantity and are permissible without flame spread ratings. If such material is used, this should be part of the product specification so that the system integrator can take care on it.

If the actual temperature in any location of the fuel cell module, where a flammable mixture may occur, is higher than the auto-ignition temperature, leakage of fuel gas into the oxidant or vice versa results in immediate oxidation of the flammable gas. Thus, it is obvious that no major concentrations of explosive gases can accumulate.

Whenever this temperature of such high-temperature fuel cells is lower than the auto-ignition temperature, the fuel cell module shall be transferred into a safe state (for example, by purging).

4.2.6 Safeguarding

The failure of a component within a safety control system (see 4.1 c) shall cause the fuel cell module to initiate a controlled shut-down. To ensure the required level of safeguarding (SIL-Level, performance level or class of control function) the safety relevant design shall comply with the relevant standards given in 4.1.

NOTE The controlled shut-down may include a time delay, or allow for the completion of an operational cycle, when immediate shut-down would result in a higher risk. An example may be the failure of a gas detector in a fuel cell module used as an emergency power supply.

4.2.7 Piping and fittings

4.2.7.1 General

Threaded connections of combustible gases conveying piping and fittings shall comply with ISO 23550. All other joints shall be welded, or at least have fitting connections with a defined sealing area as specified by the manufacturer. Unions, when used in fuel gas or oxygen lines, shall be of the ground-joint type or the flanged-joint type or the compression-joint type having packing resistant to the action of fuel gases.

The internal surfaces of piping shall be thoroughly cleaned to remove loose particles and the ends of piping shall be carefully reamed to remove obstructions and burrs.

Flexible piping and associated fittings, when used for conveying gas, shall be suitable for the application. Special consideration shall be given to hydrogen pipes, such as aging behaviour, embrittlement, porosity, etc.

NOTE Information on compliance with various requirements can be found in the following standards: ISO 37, ISO 188, ISO 1307, ISO 1402, ISO 1436 and ISO 4672 [7] to [12].

4.2.7.2 Non-metallic piping systems

Polymeric and elastomeric piping, tubing and components shall be permitted under the following conditions.

Materials shall be demonstrated to be suitable over lifetime for the combined maximum operating temperatures and pressures and compatible with other materials and chemicals they will come in contact within service and during maintenance. Adequate mechanical strength shall be demonstrated according to 5.4 and 5.5.

Plastic or elastomeric components shall be protected from mechanical damage within the fuel cell module. Shielding may be used as appropriate to protect components against failure of rotating equipment or other mechanical devices housed within the unit.

Any compartment enclosing plastic or elastomeric components used to convey flammable gases shall be protected against the possibility of overheating.

If danger of fuel flow temperature more than 10 K below the lowest heat deflection temperature cannot be excluded a control system complying with the requirements according the relevant standard as given in 4.1 to cover the allocated risk shall be provided to terminate the fuel flow.

Plastic or elastomeric materials used in a hazardous location shall be electrically conductive or otherwise designed to avoid static charge build-up, e. g. by limitation of flow rate or other. Plastic or elastomeric materials with insufficient electrical conductivity shall only be used in non-hazardous areas.

4.2.7.3 Metallic piping systems

Metallic piping systems shall be suitable for the combined maximum operating temperatures and pressures and shall be compatible with other materials and chemicals they will come in contact within service and during maintenance. Metallic piping systems shall be of sufficient mechanical integrity. Adequate mechanical strength shall be demonstrated according to 5.5 and 5.6.

Metallic piping systems shall be compliant with the leakage requirement according to 5.3.

Formed piping bends shall not promote failure caused by the forming process and shall comply with the following:

- bends shall be made only with bending equipment and procedures intended for that purpose;
- all bends shall be smooth and free from buckling, cracks, or other evidence of mechanical damage;
- the longitudinal weld of the pipe shall be near the neutral axis of the bend;
- the inside radius of a bend shall be not less than the minimum radius specified by the pipe manufacturer.

4.2.8 Electrical components

The electric system design and construction, as well as the application of the electric and electronic equipment, including electric motors and enclosures, shall meet the requirements of relevant electrical product application standard(s). For example:

- IEC 60335-1 (e.g. residential/commercial and light industrial);
- IEC 60204-1 (e.g. large industrial);
- IEC 60950-1 (e.g. telecom);
- IEC 62040-1 (e.g. UPS).

The selection of the appropriate application will be provided in the technical specification.

The fuel cell designer shall also consider the following fuel cell specific issues:

- residual charge on the fuel cell stack;
- energy hazard between cells.

The suitability of the electrical components for the ambient conditions specified for the operation of the fuel cell system shall be communicated to the fuel cell system integrator (see 7.4.1, i): range of ambient temperature and humidity for operation and storage.

If the electric components are provided by the system integrator, he shall be informed about the necessary technical specification so that safety can be ensured.

Where an enclosed fuel cell module, operating below the auto-ignition temperature of the combustible gas, does not comply with the flammable concentration limits described in 5.12, the electrical components located within the enclosure shall be suitable for the area classification as defined in IEC 60079-10, using a protection technique defined within the IEC 60079 series.

4.2.9 Terminals and electrical connections

Power connections to external circuitry shall be

- a) fixed to their mountings with no possibility of self-loosing,

- b) constructed in such a way that the conductors cannot slip out from their intended location,
- c) such that proper contact is assured without damage to the conductors that would impair the ability of the conductors to fulfil their function, and
- d) so secured against turning, twisting or permanently deforming during normal tightening onto the conductor.

Connections made directly to the fuel cell shall not be appreciably impaired by conditions occurring in normal service. Terminals of the fuel cell module shall comply with IEC 60352, IEC 60512-15 (all parts) and IEC 60512-16 (all parts) or with the requirements as given for terminals and electrical connections in the application standards according to 4.2.8.

4.2.10 Live parts

The manufacturer's technical documentation shall specify according to the relevant application standards as given in 4.2.8:

- a) accessible live parts that do not meet the requirements for safety extra low voltage (SELV);
- b) accessible live parts that present a high current hazard due to shorting.

The fuel cell system integrator shall be responsible for the protection of these live parts against electric shock.

4.2.11 Insulating materials, dielectric strength

The design of all dielectrics of the fuel cell module, applied between live parts and non current-carrying metal parts, shall be in accordance with applicable standards as given in 4.2.8 for electrical equipment of appropriate voltage class.

The mechanical characteristics of the materials that affect functional behaviour, for example compressive strength, shall comply with the design criteria at a temperature up to at least 20 K or 5 % (whichever is higher) above the maximum temperature observed under normal operation, but not less than 80 °C.

Verification shall be based on the properties and characteristics of the material as defined by the manufacturer of the material.

4.2.12 Bonding

The following applies unless the relevant application standards as given in 4.2.8 are specifying it differently

Accessible not current-carrying metal parts that are likely to become energized through electrical fault, and that can lead to an electric shock, or an electrical energy hazard, shall be bonded to a common point.

To ensure good electrical contact, these connections shall be protected against corrosion. They shall also be designed so that the conductors are secured against loosening and twisting and that contact pressure is maintained.

There shall be no electrochemical corrosion between metallic parts, which form a bonding under the expected conditions of use, storage and transportation. Resistance against electrochemical corrosion may be achieved through appropriate plating or coating processes.

4.2.13 Shock and vibration

The shock and vibration limits that the fuel cell module is designed to withstand shall be included in the manufacturer's documentation.

5 Type tests

5.1 General

Type tests shall be performed in a test facility simulating the anticipated fuel cell system or the fuel cell system itself, in order to obtain the required operating conditions. In particular, the test facility for performing the type tests of normal operation can be the conditioning facility used for the initial start-up of the fuel cell module. It is recommended that the type tests be performed in the order described below. The test of abnormal conditions may be destructive.

5.2 Shock and vibration test

The fuel cell module shall be subject to the shock and vibration test limits stated in the manufacturer's documentation.

NOTE It may be that the manufacturer has not specified shock and vibration limits, in which case no tests are required.

Compliance is given if the device under test withstands the manufacturer's specified vibration and shock criteria with no evidence of damage. The device under test operates as intended after the conditioning.

5.3 Gas leakage test

This test is not applicable for fuel cell modules with

- operating temperatures higher than the auto-ignition temperature of the combustible gas (see 4.2.5), or
- fuel cells within a gas-tight vessel already proven according to the relevant national regulations.

Where it is impractical to use the full stack, a stack with a reduced, but still representative, number of cells can be used. Leakage shall be calculated based on the ratio of cell numbers.

The fuel cell module shall be operated until it attains thermal equilibrium conditions at the maximum operating temperature under full load current.

Once these conditions have been achieved, operation is ceased, the fuel cell module may be purged and the gas outlets closed; the fuel cell module temperature shall be reduced to the lowest specified operating temperature or below. The fuel cell module shall then be pressurized, either with the nominal anode gas or helium, gradually to the maximum operating pressure, defined by manufacturer, and held steady for 1 min.

The inlet pressure shall remain stable and unchanged during the time the leakage is measured. The gas leakage rate shall be measured using a flow meter located at the inlet of the fuel cell module, upstream of a pressure relief device and capable of measuring the leakage rate with an accuracy of 2 %. If helium is used as test gas, the gas leakage rate shall be corrected according to

$$R = \text{fuel gas leakage rate/test gas leakage rate} \quad (1)$$

$$\text{where} \quad R = (TGSG/FGSG)^{1/2} \quad (2)$$

and

TGSG is the test gas specific gravity;

FGSG is the fuel gas specific gravity;

$$\text{or} \quad R = \mu_{\text{test}}/\mu_{\text{fuel}} \quad (3)$$

where

μ_{test} is the test gas absolute viscosity;

μ_{fuel} is the fuel gas absolute viscosity.

These two formulas shall be used to calculate R and the worst-case scenario, i.e. the higher value, shall be reported.

The rate of gas leakage, including the flow rate of gas through the pressure relief valve, shall be recorded.

If the pressure relief device is not included in the test, because of, for example, hysteresis or pressure setting, then the total leakage shall be the sum of the leakage of the pressure relief device alone at maximum fuel supply pressure and that obtained from this test.

The gas leakage rate, corrected to reference conditions and gas type, multiplied by 1,5 shall comply with the gas leakage rate included in the documentation (see 7.4).

NOTE It is anticipated that this information may need to be provided to the end-product user for the purpose of calculating the ventilation needs.

5.4 Normal operation

Normal operation is the operation of the fuel cell module under normal conditions, in particular

- nominal power output with respect to voltage and current;
- nominal thermal energy output with respect to temperature and cooling media flow (if applicable);
- nominal temperature range of the fuel cell module;
- nominal fuel composition;
- nominal flows of anode and cathode media;
- nominal pressure ranges of anode and cathode fluids;
- rate of change of power output within the nominal ranges defined in the manufacturer's specification.

For the normal operation type test, the fuel cell module shall be operated under the normal conditions defined above until thermal equilibrium conditions are achieved.

Measurements of the following parameters shall be taken and the results recorded in the documentation as specified in 7.4:

- a) voltage at the terminals of the fuel cell module at full load current;
- b) temperatures (fuel cell stack, fuel cell module surface, ambient);
- c) fuel pressure (gauge) from –5 % to +5 % or ± 1 kPa, whichever is the higher;
- d) fuel consumption rate from –5 % to +5 %;
- e) oxidant supply from –5 % to +5 %, if applicable;
- f) oxidant pressure from –5 % to +5 % or ± 1 kPa whichever is the higher, if applicable;
- g) coolant inlet and outlet temperature (if applicable);
- h) coolant flow rate (if applicable);
- i) coolant inlet and outlet pressure (if applicable);
- j) fuel and oxidant differential pressure.

Compliance is given if, for all parameters measured, the measured values are within the manufacturer's specified values.

5.5 Allowable working pressure test

The fuel cell module shall be tested at the maximum or minimum operating temperature, whichever is more severe.

During this test, the fuel and air sides of the fuel cell module may be interconnected if they are of the same internal pressure under normal operation. If the fuel cell module comprises a cooling system, this system may be over-pressure tested simultaneously and in the same way.

The fuel cell module (both anode and cathode channels) shall be pressurized gradually and held steady for a period of not less than 1 min to no less than 1,3 times their allowable working pressure.

If the fuel cell module comprises a pressure relief valve, it may be removed or made inoperable.

This test may be conducted during the gas leakage test or the normal operating test, provided that the test parameters can be achieved.

If the test conditions (temperature) cannot be achieved, the fuel cell module shall be tested at ambient temperature at not less than 1,5 times the allowable working pressure.

There shall be no rupture, fracture, permanent deformation or other physical damage to the fuel cell module.

5.6 Pressure withstanding test of cooling system

This test shall be performed if the cooling system is not tested during the allowable working pressure test.

The fuel cell module shall be tested at the same temperature as in the allowable working pressure test.

The cooling system of the fuel cell module shall be pressurized to 1,3 times the allowable working pressure of the cooling system, and then maintained for a period of not less than 10 min.

If the test conditions (temperature) cannot be achieved, the cooling system shall be tested at ambient temperature at 1,5 times the allowable working pressure of the cooling system.

There shall be no rupture, fracture, permanent deformation or other physical damage to the system. If the system utilizes a liquid coolant, there shall be no leakage of coolant during this test.

5.7 Continuous and short-time electrical rating

Where a manufacturer specifies a short-time current rating, the fuel cell module shall be stabilized at rated current, then the current increased to the defined short-time rating and held for the defined time, as specified by the manufacturer.

There shall be no rupture, fracture, permanent deformation or other physical damage to the system.

5.8 Overpressure test

Where the fuel cell module has a pressure-limiting device, the pressure shall be increased step by step to a value that exceeds the threshold pressure of the pressure-limiting device. If necessary, the fuel cell module inlet pressure regulator shall be disabled or bypassed for this

test. The safety mechanism shall trigger a reduction in the pressure or transfer the fuel cell module into a safe operational state.

In case of a leak before break design, this test may be destructive and may be performed under 5.13. The data of this test shall be reported to the systems integrator as shall all consequential hazards.

5.9 Dielectric strength test

Fuel cell modules can be manufactured according to two different designs:

- a) stack grounded;
- b) stack floating.

For design a), no dielectric withstand test can be applied, only the open-circuit voltage appears.

For design b), the dielectric strength test shall be applied at operating temperature, and with cooling media applied. If the fuel cell module cannot be maintained at operating temperature, the dielectric strength test shall be carried out at the maximum admissible temperature and the temperature shall be recorded. If the dielectric strength test is applicable, it shall be performed on the fully assembled fuel cell module, disconnected from the fuel supply and purged with purging gas. The test voltage shall be applied between live parts and non current-carrying metal parts. The test shall be performed either with a DC or an AC voltage of substantially sinusoidal waveform at a frequency between 48 Hz and 62 Hz. The voltage shall be increased steadily to the specified value and then maintained for at least 5 s. The results are acceptable if there is no breakdown of the insulation. The leakage current shall not exceed 1 mA multiplied by the ratio of the test voltage to the open circuit voltage. If this value cannot be met, the data of this test shall be provided to the systems integrator. All consequential hazards shall be mitigated by the systems integrator.

NOTE Dependent on the final application, a test duration over 5 s might be required.

The test voltages shall be as mentioned in Table 1.

Table 1 – Dielectric strength test voltages
(derived from EN 50178)

Column 1 Open-circuit voltage	Column 2 Test voltage, AC and DC, for testing circuits with basic insulation and circuits with protective separation		Column 3 Test voltage, AC and DC, for testing between circuits and accessible surface (non-conductive or conductive but not connected to protective earth)	
	AC r.m.s. kV	DC kV	AC r.m.s. kV	DC kV
$\leq 50 \sqrt{2} \text{ V} = 71 \text{ V}$	0,35	0,5	0,35	0,5
$100 \sqrt{2} \text{ V} = 141 \text{ V}$	0,5	0,7	0,7	1,0
$150 \sqrt{2} \text{ V} = 212 \text{ V}$	0,8	1,1	1,3	1,8
$230 \sqrt{2} \text{ V} = 325 \text{ V}$	1,1	1,6	1,8	2,5
$300 \sqrt{2} \text{ V} = 424 \text{ V}$	1,2	1,7	2,2	3,1
$400 \sqrt{2} \text{ V} = 566 \text{ V}$	1,35	1,9	2,6	3,7
$600 \sqrt{2} \text{ V} = 849 \text{ V}$	1,65	2,3	3,5	5,0
$690 \sqrt{2} \text{ V} = 976 \text{ V}$	1,8	2,5	3,8	5,4
$1 \sqrt{2} \text{ kV} = 1,41 \text{ kV}$	2,25	3,2	5,0	7,1
$1,5 \sqrt{2} \text{ kV} = 2,12 \text{ kV}$	3,0	4,2	6,4	9,1
$3 \sqrt{2} \text{ kV} = 4,24 \text{ kV}$	5,25	7,4	11,2	15,8
$6 \sqrt{2} \text{ kV} = 8,4 \text{ kV}$	9,75	13,8	17,5	24,8
$10 \sqrt{2} \text{ kV} = 14,14 \text{ kV}$	15,75	22,3	34,0	48,1
NOTE Interpolation is permitted throughout all ranges.				

5.10 Differential pressure test

For fuel cell modules that maintain different channels for the anode and the cathode within the module, the differential test is applicable. The fuel cell module shall be at the maximum or minimum operating temperature, whichever is more severe. The fuel cell module shall be gradually pressurized with an appropriate gas, either on the anode or cathode channels, and held steady for a period of not less than 1 min to no less than 1,3 times the allowable differential working pressure. If the test conditions cannot be achieved, the fuel cell module may be tested at ambient temperature at not less than 1,5 times the allowable working pressure.

The leakage rate shall be measured, for example with a flow rate meter either continuously during the test, or, if not possible, before and after pressurization at the allowable differential working pressure.

There shall be no rupture, fracture, permanent deformation or other physical damage to the fuel cell module. The leakage rate between anode and cathode side shall not increase as a result of this test and shall be within the manufacturer's specification for the temperature of the test. The measurements after pressurization shall not deviate from the initial results by more than the accuracy and repeatability of both, the instrumentation and the test set-up. This test may be omitted, if any excessive differential pressure cannot be exerted on the cells by design.

5.11 Gas leakage test (repeat)

The fuel cell module shall be re-tested for leakage without the pre-conditioning period, but at the same testing conditions as specified in 5.3.

The gas leakage rate shall not exceed that specified by the manufacturer, and not change by more than 10 % of the initial value or 5 cm³/min, whichever is higher.

5.12 Normal operation (repeat)

The normal operation test shall be repeated as defined in 5.3. The measurements recorded shall be within the rated deviations as required in 5.3.

5.13 Flammable concentration test

This test is only applicable for enclosed systems, with integrated safety ventilation and purging processes, where the operating temperature is below the auto-ignition temperature of the combustible gas.

Safety ventilation and purging processes depend on the specific features and requirements of the fuel cell module. This test shall determine the maximum flammable gas concentration within the module enclosure under normal operation.

The fuel cell module shall be operated within the nominal temperature range until thermal equilibrium conditions are achieved. The testing shall be carried out at the barometric pressure at the testing station and in an area free from appreciable draughts.

The fuel cell module enclosure shall be provided with the specified ventilation flow rate (see 7.4).

Four measurements shall be made at a distance from the purge or points of release so that the flammable concentration measured is that of the compartment rather than the source.

The test shall be continued until four consecutive measurements have shown that the increase in the flammable concentration does not exceed by more than 5 % the mean of the four measurements.

The time interval between measurements shall be not less than 30 min.

The test shall be carried out at least twice.

The test is satisfactory if the concentration of flammable gas is less than 25 % of the lower flammability limit. Where the concentration exceeds 25 % of the lower flammability limit, the provisions of 4.2.9 shall apply.

5.14 Tests of abnormal conditions

5.14.1 General

The purpose of type tests under abnormal operating conditions is to demonstrate that abnormal operating conditions, which can be predicted, do not result in hazard or damage outside the fuel cell module. Due to abnormal conditions, these tests may be destructive and they should be performed following the “normal” type tests. It is also acceptable to perform these tests on a sub-module of the fuel cell module, which will yield prototypical responses. The sequence of the tests of abnormal conditions may be different from type to type of fuel cell module; the sequence shall be ordered along the lines of increasing danger of destruction by the different test articles.

The tests of abnormal conditions shall be performed in the test facility as used for the type tests. The test facility may be modified in order to achieve the foreseen abnormal conditions.

During the tests of abnormal conditions, the maximum surface temperature of the test unit obtained shall be recorded. If this temperature is higher than that obtained under normal conditions, it shall be given to the end-product manufacturer.

The failure mode of the fuel cell module shall not present a hazard to persons or cause damage outside the fuel cell module as outlined in 5.14.1 – 5.14.6 for the various abnormal conditions scenarios. Protection against abnormal conditions may be provided either through action of the fuel cell module protection controls or through protection mechanisms provided in the end use application. In the latter case documentation shall be provided to alert the integrator of the need for and type of protection to be provided. If a test sample is damaged during the test of abnormal conditions, the following tests shall be carried out using a test sample that already passed the type test of 5.3.

If the fuel cell module shuts down by a performance degradation function (non safety-related control function) than the test shall be repeated and the non safety-related control function shall be bypassed so that the "safety device provided" shuts off the process prior to any hazardous situation occurring.

5.14.2 Fuel starvation test

The fuel cell module shall be operated at nominal power and at normal operating parameters to a steady-state condition. To provoke fuel starvation, the fuel flow is reduced to a level representing the worst-case scenario determined by a risk assessment provided by the fuel cell module manufacturer. The voltage monitoring system or other safety system shall provide a signal intended to initiate the transfer of the fuel cell module into a safe state prior to reaching a hazardous condition.

5.14.3 Oxygen/oxidant starvation test

The fuel cell module shall be operated at nominal power and at normal operating parameters to a steady-state condition. To provoke the oxygen/oxidant starvation, the oxidant flow will be reduced to a level representing the worst-case scenario determined by a risk assessment provided by the fuel cell module manufacturer. The voltage monitoring system or other safety system shall provide a signal intended to initiate the transfer of the fuel cell module into a safe state prior to reaching a hazardous condition.

5.14.4 Short-circuit test

The fuel cell module shall be operated at nominal power and at normal operating parameters to a steady-state condition. Then a short-circuit between the plus and minus pole of the fuel cell module with a minimum resistance and inductance shall be initiated by a suitable high-current switch. The short-circuit current and voltage shall be measured by suitable means, for example a pre-triggered pulse current and pulse voltage monitoring device to measure both values. These data shall be provided to the systems integrator together with all consequential hazards.

The short-circuit test may be performed on a sub-scale module together with an adequate calculation for the full-scale product.

5.14.5 Lack of cooling/impaired cooling test

At the maximum allowable power output specified by the manufacturer, while operating under the stabilized conditions specified by the manufacturer, the coolant flow, if separate from the oxidant, is instantaneously stopped in order to simulate a coolant system failure. The fuel cell module is operated:

- for the permissible duration given by the manufacturer after the coolant is shut down; or

- the fuel cell module shuts down from performance degradation prior to reaching the service temperature of the materials of construction; or
- until the fuel cell module safety device provides a signal intended to initiate the transfer of the fuel cell module into a safe state prior to reaching a hazardous condition.

5.14.6 Crossover monitoring system test

This test is only applicable to fuel cell modules with a monitoring system.

Where a crossover between the anode and the cathode results in a hazardous condition, it shall be monitored continuously by a cell voltage monitoring device or equivalent means which transfers the fuel cell module into a safe state.

The test shall be performed under normal operating conditions. A crossover shall be simulated by decreasing the monitored cell voltage under the lower switching-off threshold. This procedure shall be repeated with at least 2 % randomly selected cell voltage monitoring channels.

NOTE 1 This can be done by using a voltage divider between the cell voltage terminals and the input of the cell voltage monitoring device. The low-voltage resistor of the voltage divider may be a potentiometer by which the voltage is lowered continuously until the switching-off condition has been achieved.

NOTE 2 A reverse power or electrolysis state may occur within a fuel cell, if excessive voltage is applied, for example due to a systems failure. This may lead to hydrogen and oxygen formation and present a hazard.

5.14.7 Freeze/thaw cycle tests

This test is only applicable to PEFC fuel cell modules with a storage or operating temperature below 0 °C.

After running in normal operation in a stable manner, the fuel cell module shall be shut down. The fuel cell module is then frozen at the lowest ambient temperature condition for which the device is specified by the manufacturer. After freezing, the unit is thawed according to the manufacturer's specification until it reaches a minimum of 10 °C. This freeze/thaw cycle is repeated ten times. Afterwards, the leakage test shall be repeated.

NOTE Provided the test results are not adversely affected, thermal insulation may be removed from the fuel cell modules in order to reduce the freeze/thaw cycle time.

6 Routine tests

6.1 General

Routine tests shall be performed in a test facility simulating the anticipated fuel cell system or the fuel cell system itself, in order to obtain the required operating conditions. It is recommended to perform the routine tests in the order described below.

If routine testing is performed in direct conjunction with the initial start-up and conditioning procedure, the fuel cell module shall be connected to the conditioning facility and under operational conditions as specified by the manufacturer. Otherwise, the fuel cell module shall be integrated in a fuel cell system or system simulator as defined above and the start-up procedure shall be carried out according to the manufacturer's specification, so that the fuel cell module is under operational conditions as required by the routine tests defined below.

The following routine tests shall be performed.

6.2 Gas-tightness test

Gas-tightness tests shall be performed on all production units.

A gas-tightness test shall be performed at ambient conditions on all joints and connections of pressure-bearing components using a liquid leak detector. No bubbles shall form when exposed to the maximum operating pressure as defined in 3.16 at a normal temperature. The test shall be performed at 1,5 of the nominal operating pressure.

6.3 Dielectric strength withstand test

Dielectric strength tests shall be performed on all production units after assembly.

Dielectric strength tests shall be performed as described in 5.9 with a test duration of 1 s at a normal temperature.

NOTE Dependent on the final application, a test duration of more than 1 s might be required.

7 Markings and instructions

7.1 Nameplate

A nameplate shall be secured in a permanent manner to the fuel cell module. The marking on the nameplate shall be legible and durable, taking into account possible chemical corrosion, heat and environmental conditions.

The nameplate marking shall include at least the following information:

- a) name of manufacturer or his registered trademark;
- b) model identification;
- c) date code or serial number traceable to the date of manufacture.

7.2 Marking

If connections can be interchanged and result in unsafe conditions, they shall be identified. Polarity of the electrical connections and grounding, if applicable, shall be indicated.

7.3 Warning label

The following warning labels shall be used, as applicable:

- shock hazard;
- high temperatures;
- flammable gas or liquid;
- corrosive media;
- toxic media.

When high voltages could occur, a label “Short-circuit prior to handling” shall be affixed to the fuel cell module.

7.4 Documentation

7.4.1 General

The information necessary for system integration, installation, operation and maintenance of the fuel cell module shall be supplied in the form of drawings, diagrams, charts, tables and instructions.

The fuel cell module manufacturer shall ensure that the technical documentation specified in this clause is provided with each fuel cell module, if not agreed upon otherwise between the system integrator and the fuel cell module manufacturer.

For referencing of the above documents, the fuel cell module manufacturer shall select one of the following methods:

- each of the above documents shall carry as a cross-reference the document numbers of other documents; or
- all documents shall be listed with document numbers and titles in a drawing or document list.

The first method shall be used only where the documentation consists of a small number of documents (for example, less than five).

The following additional information shall be provided to the system integrator:

- a) general safety strategy according to 4.1;
- b) type of fuel and oxidant, acceptable fuel and oxidant species (gas composition, impurity content, etc.);
- c) fuel and oxidant gas supply pressure (minimum and maximum);
- d) fuel and oxidant consumption at rated and maximum power;
- e) maximum fuel leakage rate;
- f) acceptable fuel and oxidant supply temperature;
- g) maximum exhaust temperature;
- h) typical emissions;
- i) range of ambient temperature and humidity for operation and storage;
- j) range of altitude;

NOTE Power output is dependent on availability of oxidant. Operation at high altitude may reduce performance.

- k) permissible shock and vibration levels;
- l) normal module operating temperature;
- m) maximum surface temperature;
- n) coolant species;
- o) coolant inlet and outlet temperature set points;
- p) coolant supply pressure and flow-rate range;
- q) type and characteristics of the overcurrent/overload/overvoltage/undervoltage and other protection devices;
- r) purging and ventilation flow rate requirements;
- s) dimensions;
- t) weight;
- u) electrical output ratings (rated voltage, rated current, rated power, open-circuit voltage, voltage at full load current);
- v) maximum electrical overload;
- w) auxiliary power supply (for example, voltage, frequency, power);
- x) the end-product(s) use for which this component is intended;
- y) the location of the earth connection;
- z) appropriate information regarding end-of-life procedures.

Regulatory requirements for recycling and disposal should be taken into consideration.

7.4.2 Installation manual

The installation manual shall give a clear and comprehensive description of the installation and mounting, the electrical connections, the fuel connection, the oxidant connection and the connection to the cooling system, as far as applicable, of the fuel cell module.

The installation manual shall comprise:

- handling, transportation and storage;
- preparation;
- orientation (upper-side and lower-side position, etc.);
- fixing method of the module;
- connection method of gas and coolant piping;
- connection method of the electric line and sensors;
- general notes and prohibited handling;
- overview (block) diagram(s) where appropriate;
- circuit diagram(s).

7.4.3 Installation diagram

7.4.3.1 General

The installation diagram shall give all information necessary for the preliminary work of setting up the fuel cell module. In complex cases, it may be necessary to refer to the assembly drawings for details.

The recommended position and type of supply fittings, cables, hoses, pipes and the like to be installed on site shall be clearly indicated.

The data necessary for choosing the type, characteristics, ratings and setting of any protection device(s) to be installed shall be stated.

The size, type and purpose of ducts, trays or supports between the fuel cell module and the associated equipment that are to be provided by the user shall be detailed.

Where necessary, the diagram shall indicate where space is required for the removal or servicing of the fuel cell module.

In addition, where it is appropriate, an interconnection diagram or table shall be provided. Such a diagram or table shall give full information about all external connections.

7.4.3.2 Block (system) diagrams and function diagrams

Where it is necessary to facilitate the understanding of the principles of operation, a block (system) diagram shall be provided. A block (system) diagram symbolically represents the fuel cell module, together with its functional inter-relationships without necessarily showing all of the interconnections.

Function diagrams may be used as either part of, or in addition to, the block (system) diagram.

7.4.3.3 Circuit diagrams

Where a block (system) diagram does not sufficiently detail the elements of the fuel cell module, detailed diagrams of the different circuitry shall be furnished. These diagrams shall show the circuits on the fuel cell module and its associated equipment. Any graphical symbol not shown in IEC 60617 shall be separately shown and described on the diagrams or

supporting documents. The symbols and identification of components and devices shall be consistent throughout all documents and on the fuel cell module.

Where appropriate, a diagram showing the terminals, junctions and the like for interface connections shall be provided. That diagram may be used in conjunction with the circuit diagram(s) for simplification. The diagram shall contain a reference to the detailed circuit diagram of each unit shown.

Circuits shall be shown in such a way as to facilitate the understanding of their function as well as maintenance. Characteristics relating to the function of the control devices and components which are not evident from their symbolic representation shall be included on the diagrams adjacent to the symbol or referenced to a footnote.

7.4.4 Operation manual

Technical documentation shall contain an operation manual detailing proper procedures for set-up and use of the fuel cell module. Particular attention shall be given to the safety measures provided and to the improper methods of operation that are anticipated.

Where the operation of the fuel cell module can be programmed, detailed information on methods of programming, equipment required, programme verification and additional safety procedures (where required) shall be provided.

The operation manual shall comprise:

- start-up and operational procedure;
- sequence of operation(s);
- frequency of inspection;
- normal and emergency shut-down procedures;
- storage procedure and conditioning;
- general notes and prohibited operation;
- information on the physical environment (for example, range of ambient temperatures for operation, vibration, noise levels, atmospheric contaminants) where appropriate.

7.4.5 Maintenance manual

The technical documentation shall contain a maintenance manual detailing proper procedures and intervals for adjustment, servicing and preventive inspection, and repair. Recommendations on maintenance/service records should be part of that manual. Where methods for the verification of proper operation are provided (for example, software testing programmes), the use of those methods shall be detailed.

The fuel cell module manufacturer shall give proper instructions for disposal and recycling of parts and components.

7.4.6 Parts list

The parts list shall comprise, as a minimum, information necessary for ordering spare or replacement parts (for example, components, devices, software, test equipment, technical documentation) required for normal operation and preventive or corrective maintenance, including those that are recommended to be carried in stock by the user of the fuel cell module.

The parts list shall show for each item:

- the reference designation used in the documentation;

- its type designation;
- the supplier and alternative sources where available;
- its general characteristics, where appropriate.

Annex A (informative)

Additional information for the performance and evaluation of the tests

A.1 Estimating the leakage rate of a system when testing with a gas other than the working gas

A.1.1 General

If the fuel cell module manufacturer does not conduct the gas leakage rate test with the working gas, the gas leakage rate of the working gas has to be estimated from the leakage rate obtained with the gas used for testing (test gas).

It is known that the leakage rate of liquids and of gases is inversely proportional to the square root of the density [13]. That is:

$$\text{leakage rate proportional to } (1/D)^{1/2} \quad (\text{A.1})$$

where D is the density.

For dense gases, since D is in the denominator, the leakage rate is low and for light gases the leakage rate is high. From this it can be concluded that the leakage rate of a light gas like hydrogen, for example, is higher than when using a heavier gas such as air since hydrogen has a much smaller density than air. The specific gravity of hydrogen is 0,068 and the specific gravity of air is 1.

Similarly, the volumetric leakage rate is inversely proportional to the absolute viscosity [13]. That is:

$$\text{leakage rate proportional to } (1/\mu) \quad (\text{A.2})$$

where μ is the absolute viscosity.

The dynamic viscosity is also referred to as the absolute viscosity.

This means that viscous gases leak less than gases with low viscosity. The viscosity of air for example is higher than the viscosity of hydrogen and for this reason, hydrogen leaks more at the same conditions of temperature and pressure.

To find out which mode is applicable for a particular system an experiment shall be conducted.

By estimating the ratio of the leakage rate, when using the fuel gas, to the leakage rate, when using the gaseous test media, if the leakage rate with the test gas is known the leakage rate with the working gas can be estimated. This ratio can be called R . That is:

$$R = \text{fuel gas leakage rate/test gas leakage rate} \quad (\text{A.3})$$

A.1.2 Calculation of R by using Formula (A.1)

From Formula (A.1) the leakage rate of gases is inversely proportional to the square root of their density. Therefore, by substituting Formula (A.1) into Formula (A.3), R is the square root

of the inverse of the test gas density to the fuel density ratio. Also, since the specific gravity is the ratio of the gas density to the air density, R is as follows:

$$R = ((1/FGSG)/(1/TGSG))^{1/2} \quad (A.3)$$

where

$FGSG$ is the fuel gas specific gravity;

$TGSG$ is the test gas specific gravity.

This can be simplified to:

$$R = (TGSG/FGSG)^{1/2} \quad (A.4)$$

By doing this, if the fuel gas is lighter than the test gas, R will be greater than one and vice versa.

A.1.3 Calculation of R by using Formula (A.2)

The ratio of the leakage rate of the fuel gas to the test gas by using Formula (A.2) and placing it in Formula (A.3) is:

$$R = (1/\mu_{\text{fuel}})/(1/\mu_{\text{test}})$$

therefore,

$$R = \mu_{\text{test}}/\mu_{\text{fuel}} \quad (A.5)$$

where

μ_{test} is the test gas absolute viscosity;

μ_{fuel} is the fuel gas absolute viscosity.

Therefore, if the fuel gas is less viscous than the test gas, R will be greater than one and vice versa (Formula (A.5) is from [13]).

A.1.4 Examples

If Formula (A.4) is used, that is to say

$$R = (TGSG/FGSG)^{1/2}$$

- a) if hydrogen is the test gas as well as the fuel, R is one;
- b) if air is used as the test media for a fuel cell that will use hydrogen as the fuel, R will be $(1/0,068)^{1/2} = 3,83$.

This means that if a leakage rate of 28,3 l/h (1 ft³/h) is obtained when testing with air, it is estimated that the leakage rate with hydrogen would be 108 l/h (3,83 ft³/h).

A similar analysis can be conducted if Formula (A.5) is used for R . If air is the gaseous test medium and hydrogen is the fuel then the absolute viscosity (dynamic viscosity) of air at 300 K and at atmospheric pressure [14] is:

$$1,846 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s},$$

the absolute viscosity (dynamic viscosity) of hydrogen at 300 K and at atmospheric pressure [14] is:

$$8,963 \times 10^{-6} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$$

Therefore, $R = 2,06$.

It follows, therefore, that since the viscosity of hydrogen is lower than that of air, it will tend to leak more by a factor of 2,06.

The dynamic viscosity of gases is primarily a temperature function and essentially independent of pressure [15]. Different values of dynamic viscosity can be found in Table A.1 for some gases.

If no experiment is conducted to find out which mode of leakage a particular system has, the worst-case scenario may be used.

The results of these calculations are meant for the case where the test gas temperature and pressure will be the same as the working gas temperature and pressure.

It is recommended to use helium as the test gas for fuel cell modules that work with hydrogen.

For this case the formula is:

$$R = (H_e SG / H_2 SG)^{1/2}$$

where

$H_e SG$ is the helium specific gravity = 0,142*;

$H_2 SG$ is the hydrogen specific gravity = 0,069 5*;

NOTE “*” means “at atmospheric pressure and at 300 K”.

or

$$R = \mu_{\text{test}} / \mu_{\text{fuel}} \quad (\text{A.6})$$

where

μ_{test} is the test gas absolute viscosity;

μ_{fuel} is the fuel gas absolute viscosity.

A.1.5 Conclusion

The following procedure can be used to estimate the leakage rate of the working gas when conducting the leakage rate test with helium as the test gas. The estimate from this procedure will be for the working gas subjected to the same conditions of temperature and pressure as when the leakage rate test with helium was conducted. The leakage rate ratio, R , between the working gas to helium should be calculated and it should be multiplied by the leakage rate obtained when using helium. Two formulae should be used to calculate R and the worst-case scenario used (higher value). If hydrogen is the working gas, the formulae are:

$$R = (H_e SP / H_2 SP)^{1/2}$$

where

$H_e SP$ is the helium specific gravity = 0,142* ;

$H_2 SP$ is the hydrogen specific gravity = 0,0695*.

NOTE “*” means “at atmospheric pressure and at 300 K”.

For other working gases, $H_2 SP$ should be substituted by the actual working gas specific gravity at atmospheric pressure and at 300 K:

or

$$R = \mu_{\text{test}} / \mu_{\text{fuel}}$$

where

μ_{test} is the test gas absolute viscosity;

μ_{fuel} is the fuel gas absolute viscosity.

The absolute viscosity, that is highly dependent on temperature but not on pressure, can be obtained from Table A.1.

Table A.1 – Viscosity of gases at one atmosphere^a

Temperature °C °F	0 32	20 68	60 140	100 212	200 392	400 752	600 1 112	800 1 472	1 000 1 832
Gas	μ (lbf · s)/(ft ²) [47,88 (N · s)/(m ²)] × 10 ⁸								
Air ^b	35,67	39,16	41,79	45,95	53,15	70,42	80,72	91,75	100,8
Carbon dioxide ^b	29,03	30,91	35,00	38,99	47,77	62,92	74,96	87,56	97,71
Carbon monoxide ^b	34,60	36,97	41,57	45,96	52,39	66,92	79,68	91,49	102,2
Helium ^b	38,85	40,54	44,23	47,64	55,80	71,27	84,97	97,43	–
Hydrogen ^{b,c}	17,43	18,27	20,95	21,57	25,29	32,02	38,17	43,92	49,20
Methane ^b	21,42	22,70	26,50	27,80	33,49	43,21	–	–	–
Nitrogen ^{b,c}	34,67	36,51	40,14	43,55	51,47	65,02	76,47	86,38	95,40
Oxygen ^c	40,08	42,33	46,66	50,74	60,16	76,60	90,87	104,3	116,7
^a The units used in this table do not correspond to the International System of Units.									
^b Computed from data given in [16].									
^c Computed from data given in [17].									

A.2 Allowable working pressure test safety factor recommendation

A.2.1 General

The following is a brief summary of what was found in some North American standards on pressure relief devices/pressure relief valves (PRD/PRV). This information was used to decide what number to recommend as a safety factor for the allowable working test pressure.

A.2.2 Pressure relief devices

A.2.2.1 General

Pressure relief devices such as rupture disks should activate from 90 % of the setting to 100 %, if they are pressure activated, and from 80 % to 105 %, if they are a combination of pressure and temperature activated. These devices are also tested for flow capacity.

A.2.2.2 Relief valves

The opening pressure shall be from 90 % to 105 %. It should maintain a relieving pressure of no more than 10 % above the opening pressure when passing 24,5 kg (54 pounds) of water/h. There should not be deviations of more than 5 % due to exposure to the temperature range limits. There should not be deviations of more than 5 % due to 100 cycles of operation.

A.2.2.3 Safety valves

Start-to-discharge pressure should not be more than 110 % of the marked value. The flow capacity is measured at 120 % of the start to discharge pressure. The sealing pressure

should be not less than 65 % of the opening pressure (after the flow capacity test). After the time tests, the start to discharge and the sealing pressures should not deviate by more than 5 %.

A.2.2.4 Hydrostatic relief valves

Initial start to release pressure should be within 5 %.

A.2.3 Terms used

A.2.3.1

hydrostatic relief valve

pressure relief valve actuated by hydrostatic inlet pressure that opens in proportion to the increase in pressure over the opening pressure

A.2.3.2

popping pressure

value of increasing inlet static pressure at which the disc moves in the opening direction at a faster rate as compared with corresponding movement at higher or lower pressures; applies only to safety valves on compressible fluid service

A.2.3.3

safety valve

pressure relief valve actuated by inlet static pressure and characterized by rapid opening or pop action

Note 1 to entry: ANSI/CSANGV2-2000 [18] has the following clause:

“The effectiveness of the pressure relief devices shall be demonstrated in accordance with section 18.9 (bonfire test)”.

The bonfire tests are designed to demonstrate that the finished containers complete with the pressure relief devices specified in the design will prevent the rupture of the container when tested under some specified fire conditions.

Note 2 to entry: CGA 12.6-M94 [19] uses a big safety factor. The components are tested at four times the design pressure for 1 min.

This standard does not have a performance test for the PRD(s).

Note 3 to entry: The effectiveness of the PRD for the fuel cell module cannot be tested since it is not the end product. It is not known what pressures, in abnormal situations, the module could be subjected to. In fact, the abnormal situations are unknown at the module stage. The size and pressure of the fuel tank is unknown and so might be the gas train. Therefore, testing for performance at the module level would not be representative and using very high safety factors might be design-restrictive.

Note 4 to entry: The best idea might be to have the module manufacturer supply at least the following information to the end user:

- a) type of PRD/PRV used;
- b) setting (opening pressure) of the PRD/PRV;
- c) flow capacity;
- d) the end user should investigate the effectiveness of the module PRD/PRV in the end product.

A.2.4 Conclusion

It is recommended either using a safety factor of 132 % (110 % deviation allowed by UL 132 [20] times 120 % for a full discharge) since this represents the worst-case scenario, or making it dependent on the type of PRD/PRV used. That is, 105 % for modules that use a PRD (full discharge is immediate), evaluated to ANSI/IAS PRD 1-1998 [21] and 132 % for modules with safety relief valves evaluated to UL 132 [20].

A.3 Proposed acceptance tests

A.3.1 Leakage test

This test is not applicable for fuel cell modules with

- operating temperatures higher than the auto-ignition temperature of the combustible gas, or
- fuel cells within a gas-tight vessel.

The test procedure is as follows:

Using a sampling plan mutually agreeable to the manufacturer and the testing agency, the fuel cell module should be tested as described in 5.2. The rate of leakage should be recorded and should not exceed the value in the product specification by more than 5 %.

A.3.2 Normal operation

Using a sampling plan mutually agreeable to the manufacturer and the testing agency, the fuel cell module should be tested as described in 5.3.

A.3.3 Allowable working pressure test

In the case where the fuel cell module is encapsulated by a pressure vessel already approved by the relevant national regulations, this test is not applicable.

Using a sampling plan mutually agreeable to the manufacturer and the testing agency, the fuel cell module should be tested as described in 5.4.

A.3.4 Pressure withstanding test of cooling system

Using a sampling plan mutually agreeable to the manufacturer and the testing agency, the fuel cell module should be tested as described in 5.5.

A.3.5 Overload test

Using a sampling plan mutually agreeable to the manufacturer and the testing agency, the fuel cell module should be tested as described in 5.6.

A.3.6 Differential pressure test

Using a sampling plan mutually agreeable to the manufacturer and the testing agency, the fuel cell module should be tested as described in 5.9.

A.3.7 Safety controls

The manufacturer should verify that all safety controls are as specified during type testing for all units manufactured.

Using a sampling plan mutually agreeable to the manufacturer and the testing agency, the fuel cell module safety devices should be proven to meet their intended use, when possible.

Annex B (informative)

List of notes concerning particular conditions in certain countries

Clause/ subclause	Note
4.2.1	In Canada, CAN/CSA C22.2 N° 60529:05 [22] replaces IEC 60529
4.2.4	In Canada, If fuel cell stack assemblies are contained within a pressurized enclosure operating above 103 kPa, the enclosure shall comply with CSA B51 [23].
4.2.9	In Canada, CAN/CSA-C22.2 N° 60079-0-07 [24] replaces IEC 60079-10.

Bibliography

- [1] IEC 60050-151:2001, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 151: Electrical and magnetic devices*
- [2] IEC 62282-1:2010, *Fuel cell technologies – Part 1: Terminology*
- [3] IEC 60812, *Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)*
- [4] SAE J1739, *Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA), Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA)*
- [5] IEC 61025, *Fault tree analysis (FTA)*
- [6] IEC 60079-20-1, *Explosive atmospheres – Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification – Test methods and data*
- [7] ISO 37:2005, *Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of tensile stress-strain properties*
- [8] ISO 188:2007, *Rubber, vulcanized or thermoplastic – Accelerated ageing and heat resistance tests*
- [9] ISO 1307:2006, *Rubber and plastics hoses – Hose sizes, minimum and maximum inside diameters, and tolerances on cut-to-length hoses*
- [10] ISO 1402:2009, *Rubber and plastics hoses and hose assemblies – Hydrostatic testing*
- [11] ISO 1436:2009, *Rubber hoses and hose assemblies – Wire-braid-reinforced hydraulic types for oil-based or water-based fluids – Specification*
- [12] ISO 4672:1997, *Rubber and plastics hoses – Sub-ambient temperature flexibility tests*
- [13] KALYANAM, K.M. and HAY D.R., *Safety Guide for Hydrogen, National Research Council*
- [14] HOLMAN J.P., *Heat Transfer, Fifth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1981, p.542-543*
- [15] AVALLONE, Eugene A. and BAUMEISTER III Theodore, *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers, tenth edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1996, p.3-32 and 3-33*
- [16] *Handbook of Chemistry and Physics*, 52d ed., Chemical Rubber Company, 1971 – 1972
- [17] *Tables of Thermal Properties of Gases*, NBS Circular 564, 1955
- [18] ANSI/CSANGV2-2000, *Basic Requirements for Compressed Natural Gas Vehicle (NGV) Fuel Containers*

- [19] CGA 12.6-M94, *Vehicle Refueling Appliance*
 - [20] UL 132, *Safety Relief Valves for Anhydrous Ammonia and LP-Gas*
 - [21] ANSI/IAS PRD 1-1998, *Pressure Relief Devices for Natural Gas Vehicles (NGV) Fuel Containers*
 - [22] CSA C22.2 N° 60529-05-CAN/CSA: *Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*
 - [23] CSA B51-03 (R2007), *Boiler, Pressure Vessel, and Pressure Piping Code*
 - [24] CAN/CSA-C22.2 N° 60079-0-07, *Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres – Part 0: General Requirements*
 - [25] IEC 62282-3-100, *Fuel cell technologies – Part 3-100: Stationary fuel cell power systems – Safety*
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	44
INTRODUCTION.....	46
1 Domaine d'application	47
2 Références normatives.....	48
3 Termes et définitions	49
4 Exigences	53
4.1 Stratégie de sécurité générale.....	53
4.2 Exigences de conception.....	54
4.2.1 Généralités.....	54
4.2.2 Comportement dans des conditions normales et anormales de fonctionnement.....	54
4.2.3 Fuite.....	54
4.2.4 Fonctionnement sous pression	55
4.2.5 Feu et inflammation	55
4.2.6 Sauvegarde	56
4.2.7 Tuyauteries et accessoires	56
4.2.8 Composants électriques	58
4.2.9 Bornes et connexions électriques	58
4.2.10 Parties sous tension	59
4.2.11 Matériaux isolants, rigidité diélectrique	59
4.2.12 Liaison équipotentielle.....	59
4.2.13 Chocs et vibrations.....	59
5 Essais type.....	59
5.1 Généralités.....	59
5.2 Essai de choc et de vibration.....	60
5.3 Essai de fuite de gaz.....	60
5.4 Fonctionnement normal	61
5.5 Essai de pression de service admissible	62
5.6 Essai de résistance à la pression du système de refroidissement.....	62
5.7 Caractéristiques assignées de courant continu et de courte durée	63
5.8 Essai de surpression	63
5.9 Essai de rigidité diélectrique.....	63
5.10 Essai de pression différentielle	64
5.11 Essai de fuite de gaz (répétition)	65
5.12 Fonctionnement normal (répétition)	65
5.13 Essai de concentration inflammable	65
5.14 Essais en conditions anormales	65
5.14.1 Généralités.....	65
5.14.2 Essai de sous-alimentation en combustible.....	66
5.14.3 Essai de sous-alimentation en oxygène/oxydant.....	66
5.14.4 Essai de court-circuit.....	66
5.14.5 Essai de manque de refroidissement/de défaut de refroidissement.....	67
5.14.6 Essai du système de surveillance de perméation.....	67
5.14.7 Essais de cycle de gel/dégel	67
6 Essais individuels de série	68
6.1 Généralités.....	68

6.2	Essai d'étanchéité au gaz.....	68
6.3	Essai de rigidité diélectrique.....	68
7	Marquages et instructions.....	68
7.1	Plaque signalétique	68
7.2	Marquage	69
7.3	Etiquette d'avertissement	69
7.4	Documentation	69
7.4.1	Généralités.....	69
7.4.2	Manuel d'installation.....	70
7.4.3	Schéma d'installation.....	70
7.4.4	Manuel d'utilisation.....	71
7.4.5	Manuel de maintenance.....	72
7.4.6	Nomenclature des pièces	72
Annexe A (informative) Informations supplémentaires pour la réalisation et l'évaluation des essais		73
Annexe B (informative) Liste des notes concernant les conditions particulières dans certains pays		80
Bibliographie.....		81
Figure 1 – Composants d'un système à piles à combustible et domaine d'application de la norme		48
Tableau 1 – Tensions pour l'essai de rigidité diélectrique (dérivées de l'EN 50178)		64
Tableau A.1 – Viscosité des gaz à une atmosphère		76

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TECHNOLOGIES DES PILES À COMBUSTIBLE –

Partie 2: Modules à piles à combustible

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale CEI 62282-2 a été établie par le comité d'études 105 de la CEI: Technologies des piles à combustible.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition, publiée en 2004, son amendement (2007) et constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- intégration des définitions des dangers et emplacements dangereux sur la base de la série CEI 60079;
- la stratégie générale de sécurité est modifiée afin de prendre en compte les besoins concernant différentes normes d'application. Ces modifications s'alignent sur les modifications similaires effectuées au niveau de la CEI 62282-3-100;

- l'article relatif aux composants électriques est modifié afin de tenir compte des besoins concernant différentes normes d'application. Ces modifications s'alignent sur les modifications similaires effectuées au niveau de la CEI 62282-3-100;
- le marquage et les instructions ont été étendus afin de fournir les informations nécessaires à l'intégrateur de système.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
105/378/FDIS	105/389/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.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 62282, publiées sous le titre général *Technologies des piles à combustible*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

L'attention du lecteur est attirée sur le fait que l'Annexe B liste tous les articles traitant des différences à caractère moins permanent inhérentes à certains pays sur le sujet de cette norme.

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.

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

Les modules à piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent de manière continue le combustible fourni, comme l'hydrogène ou des gaz riches en hydrogène, des alcools, des hydrocarbures et des oxydants, en courant continu, en chaleur, en eau et en d'autres sous-produits.

Les modules à piles à combustible sont des sous-ensembles intégrés aux produits finis comportant une ou plusieurs piles à combustible et, le cas échéant, des composants supplémentaires.

TECHNOLOGIES DES PILES À COMBUSTIBLE –

Partie 2: Modules à piles à combustible

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 62282 donne les exigences minimales de sécurité et de performance des modules à piles à combustible. Cette norme s'applique aux modules à piles à combustible avec les différents types d'électrolytes suivants:

- alcalins;
- à électrolyte polymère (y compris piles à combustible à méthanol direct)¹;
- à acide phosphorique;
- à carbonates fondus;
- à oxyde solide;
- à solution aqueuse de sels.

Les modules à piles à combustible peuvent être équipés ou non d'une enveloppe et peuvent fonctionner à des niveaux de pression élevés ou à une pression proche de la pression ambiante.

Cette norme couvre uniquement les conditions qui peuvent générer des dangers pour les personnes et des dommages à l'extérieur des modules à piles à combustible. La protection contre les dommages affectant l'intérieur des modules à piles à combustible n'est pas traitée dans cette norme, si ceux-ci ne suscitent pas de dangers à l'extérieur du module.

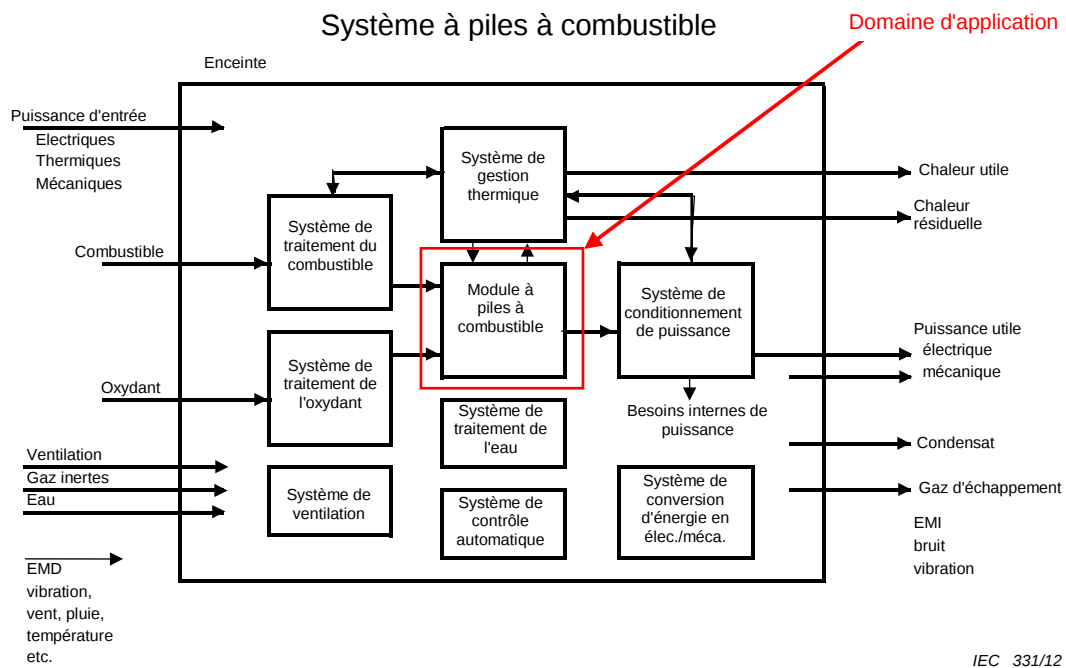
Ces exigences peuvent être remplacées par d'autres normes applicables aux équipements contenant des modules à piles à combustible dans le cadre d'applications spécifiques.

La présente norme ne couvre pas les applications de véhicules sur routes.

Cette norme n'est pas destinée à limiter ou à entraver les progrès technologiques. Un appareil utilisant des matériaux ou présentant des modes de construction différents de ceux décrits dans les exigences de cette norme peut être examiné et soumis à essai en fonction de l'objectif poursuivi par ces exigences et, s'il est jugé pratiquement équivalent, il peut être estimé conforme à la norme.

Les modules à piles à combustible sont des composants de produits finis. Ces produits nécessitent une évaluation fondée sur les exigences de sécurité appropriées qui sont applicables aux produits finis.

¹ Egalement désignée pile à combustible à membrane échangeuse de protons.



Légende

EMD perturbation électromagnétique
EMI brouillage électromagnétique

Figure 1 – Composants d'un système à piles à combustible

Cette norme ne couvre que les éléments jusqu'à la sortie en courant continu du module à piles à combustible.

Cette norme ne s'applique pas aux dispositifs périphériques représentés à la Figure 1.

Cette norme ne couvre pas le stockage du combustible et de l'oxydant ni leur fourniture au module à piles à combustible.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. 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 60079 (toutes les parties) *Atmosphères explosives*

CEI 60079-10 (toutes les Parties 10), *Atmosphères explosives – Partie 10: Classification des emplacements*

CEI 60204-1, *Sécurité des machines – Equipement électrique des machines – Partie 1: Règles générales*

CEI 60335-1, *Appareils électrodomestiques et analogues – Sécurité – Partie 1: Exigences générales*

CEI 60352 (toutes les parties), *Connexions sans soudure*

CEI 60512-15 (toutes les parties), *Connecteurs pour équipements électroniques – Essais et mesures – Partie 15: Essais (mécaniques) des connecteurs*

CEI 60512-16 (toutes les parties), *Connecteurs pour équipements électroniques – Essais et mesures – Partie 16: Essais mécaniques des contacts et des sorties*

CEI 60529, *Degrés de protection procurés par les enveloppes (Code IP)*

CEI 60617, *Symboles graphiques pour schémas*

CEI 60695 (toutes les parties), *Essais relatifs aux risques du feu*

CEI 60730-1, *Dispositifs de commande électrique automatiques à usage domestique et analogue – Partie 1: Règles générales*

CEI 60950-1, *Matériels de traitement de l'information – Sécurité – Partie 1: Exigences générales*

CEI 61508 (toutes les parties), *Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité*

CEI 62040-1, *Alimentations sans interruption (ASI) – Partie 1: Exigences générales et règles de sécurité pour les ASI*

CEI 62061, *Sécurité des machines – Sécurité fonctionnelle des systèmes de commande électriques, électroniques et électroniques programmables relatifs à la sécurité*

ISO 13849-1, *Sécurité des machines – Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité – Partie 1: Principes généraux de conception*

ISO 23550, *Dispositifs de commande et de sécurité pour brûleurs à gaz et appareils à gaz – Exigences générales*

EN 50178, *Équipement électronique utilisé dans les installations de puissance*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et les définitions suivants s'appliquent.

3.1

essai d'acceptation

essai contractuel ayant pour objet de prouver au client que l'entité répond à certaines conditions de sa spécification

[SOURCE: CEI 60050-151:2001, 151-16-23] [1]²

3.2

pression différentielle de service admissible

différence maximale de pression entre le côté de l'anode et le côté de la cathode spécifiée par le fabricant à laquelle le module à piles à combustible peut résister sans dommage ou perte permanente des propriétés fonctionnelles

² Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie.

3.3

pression de service admissible

pression relative maximale spécifiée par le fabricant à laquelle le module à piles à combustible peut résister sans dommage ou sans perte permanente des propriétés fonctionnelles

Note 1 à l'article: Pour les modules à piles à combustible équipés de limiteurs de pression, cette valeur est normalement utilisée pour définir le seuil de la pression réglée.

3.4

température ambiante

température du milieu dans lequel se trouve un appareil, un équipement ou une installation pouvant affecter la performance de l'appareil, de l'équipement ou de l'installation

3.5

conditionnement

(relatif aux cellules élémentaires/piles à combustible) étape préliminaire exigée pour faire fonctionner correctement un module à piles à combustible (3.8) et qui est réalisée selon un protocole spécifié par le fabricant

Note 1 à l'article: Le conditionnement peut comprendre des processus réversibles et/ou irréversibles en fonction de la technologie des piles à combustible.

3.6

cellule élémentaire

dispositif électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'un combustible et d'un oxydant en énergie électrique (courant continu), en chaleur et en produits de réaction

Note 1 à l'article: Le combustible et l'oxydant sont généralement stockés à l'extérieur de la cellule élémentaire et y sont transférés lorsqu'ils sont consommés.

3.7 pile à combustible

assemblage de cellules élémentaires, séparateurs, plaques de refroidissement, collecteurs et une structure de support qui en général convertit électrochimiquement des gaz riches en hydrogène et des oxydants en courant continu, en chaleur et en d'autres sous-produits

[SOURCE: CEI 62282-1:2010, 3.50] [2]

3.8

module à piles à combustible

assemblage incluant une ou plusieurs piles à combustible et d'autres composants principaux et, le cas échéant, des composants supplémentaires, destiné à être intégré dans un système de puissance

Note 1 à l'article: Les composants principaux d'un module à piles à combustible sont les suivants: une ou plusieurs piles à combustible, un circuit de tuyauteries pour le transport des combustibles, des oxydants et des produits d'évacuation, des connexions électriques pour le courant fourni par le ou les piles à combustible et des moyens de surveillance et/ou de contrôle. De plus, un module à piles à combustible peut être équipé de systèmes pour le transport de fluides supplémentaires (par exemple agents de refroidissement, gaz inertes), de systèmes pour la détection des conditions normales et/ou anormales de fonctionnement, d'enveloppes ou de réservoirs sous pression et de systèmes de ventilation.

3.9

courant assigné

intensité maximale du courant continu spécifiée par le fabricant du module à piles à combustible à laquelle le module a été conçu pour fonctionner

3.10

perméation

fuite croisée

fuite entre le côté du combustible et le côté de l'oxydant, d'une cellule élémentaire, dans l'une ou l'autre direction, généralement à travers l'électrolyte

3.11**fuite de gaz**

cumul de tous les gaz s'échappant du module à piles à combustible à l'exception des gaz d'échappement prévus

Note 1 à l'article: La fuite de gaz peut provenir

- de la pile à combustible;
- des limiteurs de pression associés;
- d'autres composants de conduites de gaz et de contrôle de flux.

3.12**danger**

source potentielle de blessures physiques de personnes, de dégâts matériels ou de dégâts environnementaux

3.13**zone dangereuse**

zone classée

toute zone ou tout espace où des poussières combustibles, des fibres inflammables ou des composés liquides, des gaz, des vapeurs ou des mélanges inflammables ou volatils sont ou peuvent être présents dans l'air en quantités suffisantes pour produire des mélanges explosifs ou inflammables

3.14**température de distorsion à chaud**

température à laquelle une éprouvette standard sous contrainte se déforme sur une distance déterminée

Note 1 à l'article: Cela est utilisé pour déterminer la résistance thermique à court terme.

3.15**limite inférieure d'inflammabilité**

LFL (en anglais *lower flammability limit*)

concentration minimale de combustible dans un mélange combustible-air pour laquelle une combustion peut être initiée par une source d'inflammation

Note 1 à l'article: Un mélange combustible-air est inflammable lorsque la combustion peut être déclenchée par une source d'inflammation. Les proportions ou la composition du mélange combustible-air constituent la composante principale. Un mélange qui contient une quantité de combustible inférieure à la quantité critique, dite limite inférieure d'inflammabilité (LFL) ou une quantité supérieure à la quantité critique, dite limite supérieure d'inflammabilité (UFL – *upper flammability limit*), ne sera pas inflammable.

3.16**pression de service maximale**

pression maximale, spécifiée par le fabricant d'un composant ou d'un système, à laquelle celui-ci a été conçu pour fonctionner de manière continue

Note 1 à l'article: La pression de service maximale est exprimée en Pa.

Note 2 à l'article: Comprend tous les paramètres normaux de fonctionnement, tant en régime stable que transitoire.

3.17**tension minimale**

tension la plus basse qu'un module à piles à combustible est capable de produire sans interruption à sa puissance assignée ou dans les conditions de surcharge maximales admissibles, aussi faible que soit la tension

Note 1 à l'article: La tension minimale est exprimée en V.

3.18

ventilation naturelle

mouvement et renouvellement d'air frais dus aux effets du vent et/ou des gradients de température

3.19

tension de circuit ouvert

tension aux bornes d'une pile à combustible en présence du combustible et de l'oxydant, lorsque aucun courant extérieur ne circule

Note 1 à l'article: La tension de circuit ouvert est exprimée en V.

3.20

essai individuel de série

essai de conformité effectué sur chaque entité en cours ou en fin de fabrication

[SOURCE: CEI 60050-151:2001, 151-16-17]

Note 1 à l'article: A ne pas confondre avec « Essai de conformité » [CEI 60050-151:2001, 151-16-15]: essai destiné à l'évaluation de la conformité ni avec « Evaluation de la conformité » [CEI 60050-151:2001, 151-16-14]: examen systématique du degré de satisfaction d'un produit, d'un processus ou d'un service aux exigences spécifiées.

3.21

conditions standards

conditions d'essai ou de fonctionnement préalablement déterminées pour servir de base à l'essai afin d'obtenir des ensembles de données d'essai reproductibles et comparables

3.22

sauvegarde

actions de l'équipement de commande, basées sur des paramètres de processus, entreprises pour éviter des états qui pourraient être dangereux pour le personnel ou susceptibles d'endommager la pile à combustible ou son environnement

3.23

très basse tension de sécurité

TBTS

tension dans des conditions de fonctionnement normal et de premier défaut qui ne dépasse pas 30 V efficace ou 42,4 V crête/c.c. dans des environnements secs ou en cas d'éventuel contact humide, 15 V efficace ou 21,2 V crête/c.c.

3.24

conditions d'équilibre thermique

conditions de température stable, caractérisées par des variations de température inférieures ou égales à 3 K (5 °F) ou à 1 % de la température de fonctionnement absolue, selon les variations les plus significatives entre deux lectures espacées de 15 min

3.25

stabilité thermique

conditions isothermes de température stable

3.26

essai type

essai de conformité effectué sur une ou plusieurs entités représentatives de la production

[SOURCE: CEI 60050-151:2001, 151-16-16]

NOTE 1 à l'article: A ne pas confondre avec « Essai de conformité » [CEI 60050-151:2001, 151-16-15]: essai destiné à l'évaluation de la conformité, ni avec « Evaluation de la conformité » [CEI 60050-151:2001, 151-16-14]: examen systématique du degré de satisfaction d'un produit, d'un processus ou d'un service aux exigences spécifiées.

4 Exigences

4.1 Stratégie de sécurité générale

Le fabricant doit réaliser sous forme écrite une analyse des risques afin de garantir que:

- a) tous les dangers, situations et événements dangereux raisonnablement prévisibles au cours de la durée de vie prévue du système à piles à combustible ont été identifiés (voir l'Annexe A qui répertorie les risques types);
- b) le risque pour chacun de ces dangers a été estimé à partir de la combinaison des probabilités d'occurrence du danger et de sa sévérité prévisible;
- c) les deux facteurs qui déterminent chacun des risques estimés (probabilité et sévérité) ont été éliminés ou réduits à un niveau ne dépassant pas le niveau de risque acceptable, dans la mesure du possible par les dispositions suivantes:
 - 1) conception à sécurité intrinsèque de la construction et de ses méthodes, ou
 - 2) contrôle passif des libérations d'énergie sans mise en danger de l'environnement immédiat (par exemple, disques d'éclatement, détendeurs, dispositifs de coupure thermiques) ou par des fonctions de contrôle liées à la sécurité, et
 - 3) concernant les risques résiduels ne pouvant pas être réduits par les mesures décrites en 1) et 2), la fourniture d'étiquettes, d'avertissements ou d'exigences de formation spécifique doit être assurée, en tenant compte du fait que ces mesures doivent nécessairement être comprises par les personnes présentes dans la zone des dangers.

Concernant la sécurité fonctionnelle, le niveau de sévérité exigé, le niveau de performance exigé ou la classe de la fonction de contrôle doivent être déterminés et conçus conformément, par exemple à:

- la CEI 62061 (respectivement ISO 13849-1) pour les applications conformes à la CEI 60204-1;
- la CEI 60730-1 pour les appareils conformes à la CEI 60335-1;
- la CEI 61508 (toutes les parties) pour les autres applications.

Dans le cas des méthodes d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) et d'analyse par arbre de panne, les normes suivantes peuvent être utilisées à titre de guide:

- CEI 60812 [3];
- SAE J1739 [4];
- CEI 61025 [5].

L'évaluation doit également couvrir les risques éventuels suivants:

- température de la pile à combustible, et
- tension de la pile à combustible et/ou de la cellule élémentaire,
- pression des parties sous pression.

De plus, un soin particulier doit être apporté à la couverture des aspects suivants:

- dangers mécaniques – surfaces tranchantes, dangers de déclenchement, masses en mouvement et instabilité, résistance des matériaux, et liquides ou gaz sous pression;
- dangers électriques – contact des personnes avec des parties sous tension, courts-circuits, haute tension;
- dangers CEM – dysfonctionnements du module à piles à combustible lorsqu'il est exposé aux phénomènes électromagnétiques ou dysfonctionnements d'autres équipements (situés à proximité) dus à des émissions électromagnétiques provenant du module à piles à combustible;

- dangers thermiques – surfaces chaudes, dégagement de liquides ou de gaz de température élevée, fatigue thermique;
- dangers de feu et d'explosion – gaz ou liquides inflammables, possibilité de mélanges explosifs dans les conditions normales et anormales de fonctionnement, possibilité de mélanges explosifs en conditions de défaut;
- dangers de dysfonctionnement – fonctionnement non sûr dû à des défaillances des logiciels, des composants des circuits de contrôle ou des composants de protection/de sécurité ou fabrication incorrecte ou mauvais fonctionnement;
- dangers liés aux matériaux et aux substances – détérioration de matériaux, corrosion, fragilisation, dégagements toxiques;
- dangers liés à l'élimination des déchets – élimination des matériaux toxiques, recyclage, élimination des liquides ou des gaz inflammables;
- dangers liés à l'environnement – fonctionnement dans de mauvaises conditions de sécurité dans des environnements chauds/froids, avec de la pluie, des inondations, du vent, des séismes, des feux extérieurs, de la fumée.

4.2 Exigences de conception

4.2.1 Généralités

Le module à piles à combustible doit être conçu conformément à l'évaluation de risques réalisée par le fabricant du module à piles à combustible. Toutes les pièces doivent être

- a) adaptées à la plage de températures, de pressions, de débits, de tensions et de courants à laquelle elles sont soumises lorsqu'elles sont utilisées selon l'usage prévu, et
- b) à l'épreuve des réactions, processus et autres conditions auxquels elles sont exposées lorsqu'elles sont utilisées selon l'usage prévu.
- c) La qualité et l'épaisseur des matériaux utilisés dans le module à piles à combustible, leurs éléments accessoires et leurs bornes ainsi que la méthode d'assemblage des différentes parties, doivent être telles que les caractéristiques de construction et de fonctionnement ne soient pas modifiées de façon significative au cours d'une durée de vie raisonnable et dans des conditions normales d'installation et d'utilisation. Toutes les parties du module à piles à combustible doivent résister aux conditions mécaniques, chimiques et thermiques auxquelles elles sont susceptibles d'être soumises dans le cadre de l'utilisation normale du produit final.

Les enveloppes de modules à piles à combustible doivent être conformes aux exigences définies dans la CEI 60529 pour s'adapter au système d'application. Le module à piles à combustible doit porter le code IP en conséquence.

NOTE Une caractéristique assignée IP00 de classe sans protection peut être appropriée lorsque le matériel final dispose d'une enveloppe de protection.

4.2.2 Comportement dans des conditions normales et anormales de fonctionnement

Le module à piles à combustible doit être conçu de manière à résister à toutes les conditions normales de fonctionnement définies dans la spécification du fabricant sans subir de dommages. Les conditions anormales de fonctionnement doivent être couvertes conformément au 4.1.

4.2.3 Fuite

En fonction de la conception, il peut se produire des fuites de gaz ou de liquides combustibles (essai voir 5.3). Le débit de fuite du gaz doit être inclus dans le document de spécification de manière que l'intégrateur du système à piles à combustible puisse déterminer la capacité minimale du système de ventilation nécessaire (voir 7.4.1,r), exigences de débit de purge et de ventilation.

Le mode de panne "perméation" doit être intégré dans l'évaluation des risques conformément au 4.1. Des mesures, par exemple des "dispositifs de surveillance de la tension des piles", doivent être mises en place conformément à la norme correspondante indiquée au 4.1.

En l'absence de protection contre la perméation dans le module à piles à combustible, la documentation du produit doit décrire tous les dispositifs de protection ou toutes les procédures de fonctionnement que doit fournir l'intégrateur de système.

NOTE Pour la classification des zones dangereuses, se reporter à la CEI 60079-10.

4.2.4 Fonctionnement sous pression

Si le module à piles à combustible est équipé d'enveloppes étanches aux gaz ou sous pression, ces enveloppes doivent être conformes aux réglementations nationales.

Les conditions de fonctionnement sous pression qui pourraient générer des conditions dangereuses à l'extérieur du module doivent être identifiées (voir 4.1), et ces informations doivent être transmises à l'intégrateur de système.

NOTE Les modules suivants présentent des propriétés particulières:

Modules à piles à combustible PEFC

La pression n'est pas un facteur important pour la conception des piles à combustible de type PEFC (pile à combustible à électrolyte polymère – en anglais *polymer electrolyte fuel cell stack*). Le dimensionnement, le choix des matériaux et des règles de fabrication d'une pile à combustible PEFC sont essentiellement fondés sur les exigences de résistance, de rigidité et de stabilité suffisantes pour satisfaire aux caractéristiques statiques, dynamiques et/ou autres caractéristiques opérationnelles. Par exemple, un modèle utilisant un matériel à compression de force coaxiale fuit avant de se briser.

Modules à piles à combustible PAFC

Les modules de type PAFC (pile à combustible à acide phosphorique – en anglais *phosphoric acid fuel cell*) fonctionnent généralement à la pression atmosphérique.

Modules à piles à combustible MCFC

Pour un fonctionnement sous pression d'une MCFC (pile à combustible à carbonates fondus – en anglais *molten carbonate fuel cell*), le module MCFC est intégré dans un système MCFC. Ce système MCFC abrite le module MCFC et est conçu conformément aux codes nationaux et internationaux ainsi qu'aux normes applicables concernant les systèmes sous pression.

Un danger dû à la pression associée à un module MCFC peut être exclu en raison de la présence d'une enveloppe conforme aux réglementations mentionnées.

Modules à piles à combustible SOFC

Si un fonctionnement sous pression d'une SOFC (pile à combustible à oxydes solides – en anglais *solid oxide fuel cell*) est envisagé, le module SOFC est intégré dans un système SOFC. Pour cette application, le module SOFC est enfermé à l'intérieur d'un réservoir sous pression conçu, fabriqué et équipé conformément aux codes nationaux et internationaux ainsi qu'aux normes applicables concernant les systèmes sous pression.

4.2.5 Feu et inflammation

4.2.5.1 Généralités

Le module à piles à combustible doit être protégé par des moyens (par exemple ventilation, détecteurs de gaz, oxydation contrôlée, températures de fonctionnement supérieures à la température d'auto-inflammation, etc.) tels que les gaz fuyant à l'intérieur du module à piles à combustible ou s'en échappant ne puissent pas former de concentrations explosives.

Les critères de conception de ces moyens (par exemple débit de ventilation exigé) doivent être fournis par le fabricant du module à piles à combustible. Les moyens doivent être fournis soit par le fabricant du module à piles à combustible soit par le fabricant du système à piles à combustible. Si le fabricant de piles à combustible ne fournit pas ces moyens, il doit alors fournir les critères de conception et d'essai de ces moyens (par exemple débit de ventilation exigé).

Les composants et les matériaux se trouvant en atmosphères explosives gazeuses classées doivent être construits ou doivent utiliser des matériaux tels que la propagation du feu et de l'inflammation soit limitée. L'inflammabilité des matériaux doit être telle qu'un feu soutenu ne perdure pas après coupure du courant électrique et de l'alimentation en combustible et en oxydant. Cela peut être démontré en choisissant des matériaux V 0, V 1 ou V 2 conformes à la série CEI 60695.

NOTE Les températures d'auto-inflammation communément répertoriées dans les normes, telles que la CEI 60079-20-1[6], sont les températures minimales auxquelles un mélange gazeux inflammable peut s'enflammer. Les températures d'auto-inflammation réelles peuvent être bien supérieures à ces valeurs selon la géométrie de surface, le matériau et les mélanges gazeux réels. Cette exigence fait référence à une température d'auto-inflammation à laquelle un gaz inflammable peut s'enflammer dans toutes les conditions applicables aux matériaux et à la géométrie choisis.

Les exigences de la norme d'application indiquées au 4.1 doivent être prises en compte concernant la "Résistance à la chaleur et au feu".

4.2.5.2 Exemptions

Les membranes ou autres matériaux à l'intérieur du volume de la pile à combustible qui représentent moins de 10 % de la masse totale du module à piles à combustible sont considérés comme une quantité limitée et sont admissibles sans tenir compte de leurs caractéristiques assignées de propagation de la flamme. Si l'on utilise ce type de matériau, il convient qu'il figure dans la spécification du produit de façon que l'intégrateur de système puisse le prendre en compte.

Si la température réelle à un emplacement quelconque du module à piles à combustible, où un mélange inflammable peut apparaître, est supérieure à la température d'auto-inflammation, la fuite du gaz combustible dans l'oxydant ou vice versa entraîne une oxydation immédiate du gaz inflammable. Ainsi, il est évident qu'il ne peut pas y avoir d'accumulation de concentrations importantes de gaz explosifs.

Lorsque la température de telles piles à combustible à haute température est inférieure à la température d'auto-inflammation, le module à piles à combustible doit être mis dans un état sûr (par exemple en purgeant).

4.2.6 Sauvegarde

La défaillance d'un composant dans un circuit de contrôle de sécurité (voir 4.1 c) doit provoquer un arrêt contrôlé initié par le module à piles à combustible. Pour garantir le niveau de sauvegarde exigé (niveau d'intégrité de sécurité SIL, niveau de performance ou classe de fonction de contrôle), la conception de sécurité appropriée doit être conforme aux normes correspondantes indiquées au 4.1.

NOTE L'arrêt contrôlé peut comprendre une temporisation ou permettre l'achèvement d'un cycle de fonctionnement lorsque l'arrêt immédiat risquerait d'engendrer un risque plus élevé. Un exemple peut être la défaillance d'un détecteur de gaz dans un module à piles à combustible utilisé comme une alimentation d'urgence.

4.2.7 Tuyauteries et accessoires

4.2.7.1 Généralités

Les raccords filetés des tuyauteries et accessoires pour le transport des gaz combustibles doivent être conformes à l'ISO 23550. Tous les autres joints doivent être soudés ou doivent au moins posséder des raccords avec une zone de scellement définie telle que spécifiée par le fabricant. Les raccords d'union, lorsqu'ils sont utilisés dans les conduites de gaz combustible ou d'oxygène, doivent être du type à joint rodé ou à assemblage par brides ou encore du type à compression avec des garnitures qui résistent à l'action des gaz combustibles.

Les surfaces internes des tuyaux doivent être entièrement nettoyées pour éliminer les particules libres et les extrémités des tuyaux doivent être soigneusement alésées pour enlever les éléments de nature à boucher et les bavures.

Les tuyaux flexibles et les accessoires associés, lorsqu'ils sont utilisés pour transporter le gaz, doivent être adaptés à l'application. Une attention particulière doit être apportée aux tuyaux pour l'hydrogène, par exemple concernant le comportement de vieillissement, la fragilisation, la porosité, etc.

NOTE L'information sur la conformité avec les différentes exigences peut être trouvée dans les normes suivantes: ISO 37, ISO 188, ISO 1307, ISO 1402, ISO 1436 et ISO 4672 [7] à [12].

4.2.7.2 Tuyauteries non métalliques

Les tuyaux, les tubes et les composants polymères et élastomères doivent être autorisés dans les conditions suivantes.

Il doit être démontré que les matériaux sont adaptés, pendant leur durée de vie, aux températures et pressions maximales de fonctionnement combinées et qu'ils sont compatibles avec les autres matériaux et produits chimiques avec lesquels ils entreront en contact en service ou au cours de la maintenance. Il doit être démontré qu'ils présentent une résistance mécanique appropriée selon 5.4 et 5.5.

Les composants plastiques ou élastomères doivent être protégés contre les dommages mécaniques à l'intérieur du module à piles à combustible. Le blindage peut être utilisé, quand cela est approprié pour protéger les composants contre les défaillances des équipements rotatifs ou d'autres dispositifs mécaniques se trouvant à l'intérieur de l'unité.

Tous les compartiments contenant des composants plastiques ou élastomères utilisés pour transporter des gaz inflammables doivent être protégés contre les échauffements éventuels.

Si l'on ne peut exclure le danger que la température du flux de combustible atteigne un point inférieur de plus de 10 K à la température de distorsion à chaud la plus faible, un système de contrôle conforme aux exigences de la norme correspondante indiquée au 4.1 afin de couvrir le risque encouru doit être prévu pour arrêter le flux de combustible.

Les matériaux plastiques ou élastomères utilisés dans un emplacement dangereux doivent être électriquement conducteurs ou avoir une conception différente permettant d'éviter la formation de charge statique, par exemple, par limitation du débit ou autre. Les matériaux plastiques ou élastomères avec une conductivité électrique insuffisante doivent seulement être utilisés dans les zones non dangereuses.

4.2.7.3 Tuyauteries métalliques

Les circuits de tuyauteries métalliques doivent être adaptés aux températures et pressions maximales de fonctionnement combinées et doivent être compatibles avec les autres matériaux et produits chimiques avec lesquels ils entreront en contact en service ou au cours de la maintenance. Les circuits de tuyauteries métalliques doivent présenter une intégrité mécanique suffisante. Il doit être démontré qu'ils présentent une résistance mécanique appropriée selon 5.5 et 5.6.

Les circuits de tuyauteries métalliques doivent être conformes à l'exigence de fuite donnée en 5.3.

Les coudes formés par les tuyauteries ne doivent pas faciliter les défaillances causées par le processus de formation et doivent être conformes à ce qui suit:

- les coudes doivent être réalisés uniquement avec un équipement et des procédures de cintrage destinés à cet effet;
- tous les coudes doivent être lisses et exempts de voilement, de fissures ou de tout autre signe de dommage mécanique;
- la soudure longitudinale de la tuyauterie doit se trouver à proximité de l'axe neutre du coude;

- le rayon intérieur d'un coude ne doit pas être inférieur au rayon minimal spécifié par le fabricant de tuyauterie.

4.2.8 Composants électriques

La conception et la construction du système électrique, ainsi que l'application de l'équipement électrique et électronique, y compris les moteurs électriques et les enceintes, doivent se conformer aux exigences de la ou des normes d'application de produits électriques appropriées. Par exemple:

- CEI 60335-1 (par exemple environnements résidentiels, commerciaux et de l'industrie légère);
- CEI 60204-1 (par exemple grande industrie);
- CEI 60950-1 (par exemple télécoms);
- CEI 62040-1 (par exemple alimentation sans interruption ASI).

Le choix de l'application appropriée est indiqué dans la spécification technique.

Le concepteur de la pile à combustible doit également tenir compte des aspects spécifiques suivants concernant la pile à combustible:

- charge résiduelle sur la pile à combustible;
- danger énergétique entre les cellules.

La bonne adaptation des composants électriques aux conditions ambiantes spécifiées pour le fonctionnement du système à piles à combustible doit être communiquée à l'intégrateur de systèmes à piles à combustible (voir 7.4.1, i): plage de températures ambiantes et d'humidité pour le fonctionnement et le stockage.

Si les composants électriques sont fournis par l'intégrateur de systèmes, il doit être informé de la spécification technique nécessaire de façon à garantir la sécurité.

Lorsqu'un module à piles à combustible sous enveloppe qui fonctionne en-dessous de la température d'auto-inflammation du gaz combustible n'est pas conforme aux limites de concentrations inflammables décrites en 5.12, les composants électriques situés dans l'enveloppe doivent être adaptés à la classification des emplacements définie dans la CEI 60079-10, en utilisant une technique de protection définie dans le cadre de la série CEI 60079.

4.2.9 Bornes et connexions électriques

Les connexions électriques aux circuits externes doivent être

- a) fixées sur leurs montages sans possibilité de se détacher d'elles-mêmes,
- b) construites de telle manière que les conducteurs ne puissent pas glisser de l'emplacement qui leur est prévu,
- c) telles qu'un contact correct soit assuré sans dommage pour les conducteurs de nature à les empêcher de remplir leur fonction, et
- d) fixées de manière à être à l'épreuve des rotations, des torsions ou des déformations permanentes au cours du serrage normal sur le conducteur.

Les connexions réalisées directement avec la pile à combustible ne doivent pas être affectées de manière appréciable par les conditions qui apparaissent en service normal. Les bornes du module à piles à combustible doivent être conformes à la CEI 60352, la CEI 60512-15 (toutes les parties) et la CEI 60512-16 (toutes les parties) ou aux exigences définies pour les bornes et les connexions électriques dans les normes d'application selon 4.2.8.

4.2.10 Parties sous tension

Le fabricant doit spécifier dans sa documentation technique, conformément aux normes d'application appropriées indiquées au 4.2.8:

- a) les parties sous tension accessibles qui ne satisfont pas aux exigences applicables à la très basse tension de sécurité (TBTS);
- b) les parties sous tension accessibles qui présentent un danger de courant élevé dû à un court-circuit.

L'intégrateur de systèmes à piles à combustible doit être responsable de la protection de ces parties sous tension contre les chocs électriques.

4.2.11 Matériaux isolants, rigidité diélectrique

La conception de l'ensemble des diélectriques du module à piles à combustible, appliqués entre les parties sous tension et les parties métalliques non conductrices, doit être conforme aux normes applicables indiquées au 4.2.8, relatives aux appareils électriques de la classe de tension appropriée.

Les caractéristiques mécaniques des matériaux qui affectent le comportement fonctionnel, par exemple la résistance à la compression, doivent être conformes aux critères de conception à une température jusqu'au moins 20 K ou 5 % (en prenant la valeur la plus élevée) au-dessus de la température maximale observée dans les conditions normales de fonctionnement, mais sans être inférieure à 80 °C.

La vérification doit être fondée sur les propriétés et les caractéristiques du matériau telles que définies par le fabricant du matériau.

4.2.12 Liaison équipotentielle

Ce qui suit s'applique, sauf si les normes d'application correspondantes, indiquées au 4.2.8, le spécifient différemment.

Les parties métalliques non conductrices accessibles qui sont susceptibles de se charger par un défaut électrique, et qui peuvent conduire à un choc électrique, ou à un danger énergétique électrique, doivent présenter une liaison équipotentielle en un point commun.

Pour assurer un bon contact électrique, ces connexions doivent être protégées contre la corrosion. Elles doivent être également conçues de manière que les conducteurs soient protégés contre le desserrage et le torsadage et que la pression de contact soit maintenue.

Il ne doit pas y avoir de corrosion électrochimique entre les parties métalliques qui forment une liaison équipotentielle dans les conditions attendues d'utilisation, de stockage et de transport. La résistance contre la corrosion électrochimique peut être obtenue par un placage approprié ou des processus de revêtement.

4.2.13 Chocs et vibrations

Les limites de chocs et de vibrations auxquelles le module à piles à combustible est destiné à résister doivent être spécifiées dans la documentation du fabricant.

5 Essais type

5.1 Généralités

Les essais type doivent être réalisés dans une installation d'essai qui simule le système à piles à combustible escompté ou le système à piles à combustible lui-même de manière à obtenir les conditions de fonctionnement exigées. En particulier, l'installation d'essai pour la

réalisation des essais type de fonctionnement normal peut être l'installation de conditionnement utilisée pour le démarrage initial du module à piles à combustible. Il est recommandé de réaliser les essais type dans l'ordre décrit ci-dessous. L'essai des conditions anormales peut être destructif.

5.2 Essai de choc et de vibration

Le module à piles à combustible doit être soumis aux essais de choc et de vibration aux limites spécifiées dans la documentation du fabricant.

NOTE Il est possible que le fabricant ait omis de spécifier les limites de choc et de vibration; dans ce cas, aucun essai n'est exigé.

La conformité est accordée si le dispositif en essai résiste aux critères de vibration et de choc spécifiés par le fabricant sans présenter de signe de dommage. Le dispositif en essai est mis en fonctionnement comme prévu après le conditionnement.

5.3 Essai de fuite de gaz

Cet essai n'est pas applicable aux modules à piles à combustible

- dont les températures de fonctionnement sont supérieures à la température d'auto-inflammation du gaz combustible (voir 4.2.5), ou
- dont les piles à combustible se trouvent à l'intérieur d'un réservoir étanche au gaz approuvé selon les réglementations nationales en vigueur.

Lorsqu'il est impossible en pratique d'utiliser la pile à combustible complète, une pile à combustible avec un nombre réduit, mais néanmoins représentatif, de cellules élémentaires peut être utilisée. La fuite doit être calculée à partir du rapport des nombres de cellules élémentaires.

Le module à piles à combustible doit fonctionner jusqu'à ce qu'il atteigne les conditions d'équilibre thermique à la température maximale de fonctionnement avec le courant de pleine charge.

Dès que ces conditions sont atteintes, le fonctionnement est interrompu, le module à piles à combustible peut être purgé et les sorties de gaz fermées; la température du module à piles à combustible doit être réduite pour atteindre la température de fonctionnement spécifiée la plus faible ou une température inférieure. Le module à piles à combustible doit ensuite être placé sous pression avec la quantité nominale de gaz d'anode ou d'hélium pour atteindre progressivement la pression maximale de fonctionnement, définie par le fabricant, et y être maintenu pendant 1 min.

La pression d'entrée doit rester stable et inchangée pendant le temps que dure la mesure de la fuite. Le débit de la fuite du gaz doit être mesuré en utilisant un débitmètre situé à l'entrée du module à piles à combustible, en amont du limiteur de pression, qui soit capable de mesurer le débit de fuite avec une précision de 2 %. Si de l'hélium est utilisé comme gaz d'essai, le débit de la fuite de gaz doit être corrigé comme suit

$$R = \text{débit de fuite du gaz combustible} / \text{débit de fuite du gaz d'essai} \quad (1)$$

$$\text{où} \quad R = (TGSG/FGSG)^{1/2} \quad (2)$$

et

TGSG est la masse spécifique du gaz d'essai;

FGSG est la masse spécifique du gaz combustible;

$$\text{ou} \quad R = \mu_{\text{test}} / \mu_{\text{fuel}} \quad (3)$$

où

μ_{test} est la viscosité absolue du gaz d'essai;

μ_{fuel} est la viscosité absolue du gaz combustible.

Ces deux formules doivent être utilisées pour calculer R , et le scénario du cas le plus défavorable, c'est-à-dire la valeur la plus élevée, doit être consigné.

Le débit de la fuite de gaz, y compris le débit du flux de gaz traversant le limiteur de pression doit être enregistré.

Si le limiteur de pression n'est pas inclus dans l'essai en raison, par exemple, de l'hystérésis ou du réglage de pression, alors la fuite totale doit être la somme de la fuite du limiteur de pression seul à la pression maximale d'alimentation en combustible et de celle de cet essai.

Le débit de fuite de gaz, corrigé d'après les conditions de référence et le type de gaz, multiplié par 1,5 doit être conforme au débit de fuite de gaz inclus dans la documentation (voir 7.4).

NOTE Il est prévu que cette information peut devoir être fournie à l'utilisateur du produit final pour déterminer les besoins en ventilation.

5.4 Fonctionnement normal

On entend par fonctionnement normal le fonctionnement du module à piles à combustible dans des conditions normales, en particulier

- puissance électrique nominale en fonction de la tension et de l'intensité;
- puissance thermique nominale en fonction de la température et du fluide de refroidissement (si applicable);
- plage de températures nominale du module à piles à combustible;
- composition nominale du combustible;
- flux nominaux des milieux d'anode et de cathode;
- plages de pression nominale des fluides d'anode et de cathode;
- rythme de variation de la puissance électrique dans les plages nominales définies dans la spécification du fabricant.

Pour l'essai type de fonctionnement normal, le module à piles à combustible doit être mis en fonctionnement dans les conditions normales définies ci-dessus jusqu'à ce que les conditions d'équilibre thermique soient atteintes.

Les paramètres suivants doivent être mesurés et les résultats doivent être enregistrés dans la documentation tel que spécifié en 7.4:

- a) tension aux bornes du module à piles à combustible à la valeur du courant de pleine charge;
- b) températures (de la pile à combustible, de la surface du module à piles à combustible, température ambiante);
- c) pression du combustible (manométrique) dans les limites de -5% à $+5\%$ ou ± 1 kPa, en prenant la valeur la plus élevée;
- d) vitesse de consommation du combustible dans les limites de -5% à $+5\%$;
- e) vitesse d'alimentation en oxydant dans les limites de -5% à $+5\%$, le cas échéant;
- f) pression de l'oxydant dans les limites de -5% à $+5\%$ ou ± 1 kPa, en prenant la valeur la plus élevée, le cas échéant;
- g) température d'entrée et de sortie du fluide de refroidissement (le cas échéant);

- h) vitesse du flux du fluide de refroidissement (le cas échéant);
- i) pression d'entrée et du fluide d'agent de refroidissement (le cas échéant);
- j) pression différentielle du combustible et de l'oxydant.

La conformité est accordée si, pour tous les paramètres mesurés, les valeurs mesurées sont conformes aux valeurs spécifiées par le fabricant.

5.5 Essai de pression de service admissible

Le module à piles à combustible doit être soumis à l'essai à la température maximale ou minimale de fonctionnement, en prenant celle qui est la plus sévère.

Au cours de cet essai, les côtés combustible et air du module à pile à combustible peuvent être interconnectés s'ils ont la même pression interne dans les conditions normales de fonctionnement. Si le module à piles à combustible comprend un système de refroidissement, ce système peut être soumis à des essais de surpression simultanément et de la même manière.

Le module à piles à combustible (à la fois côtés anode et cathode) doit être mis sous pression de manière progressive et doit être maintenu sous pression pendant une période comprise entre au moins 1 min et une valeur qui ne soit pas inférieure à 1,3 fois leur pression de service admissible.

Si le module à piles à combustible est équipé d'un limiteur de pression, celui-ci peut être retiré ou mis hors fonction.

Cet essai peut être réalisé aussi bien pendant l'essai de fuite de gaz que pendant l'essai de fonctionnement normal, du moment que les paramètres d'essai peuvent être obtenus.

Si les conditions d'essai (température) ne peuvent pas être obtenues, le module à piles à combustible doit être soumis à l'essai à température ambiante à une pression qui n'est pas inférieure à 1,5 fois la pression de service admissible.

Le module à piles à combustible ne doit subir ni rupture, ni fracture, ni déformation permanente, ni autre dommage physique.

5.6 Essai de résistance à la pression du système de refroidissement

Cet essai doit être réalisé si le système de refroidissement n'est pas soumis à essai pendant l'essai de pression de service admissible.

Le module à piles à combustible doit être soumis à l'essai à la même température que pendant l'essai de pression de service admissible.

Le système de refroidissement du module à piles à combustible doit être mis sous une pression égale à 1,3 fois la pression de service admissible du système de refroidissement puis celle-ci doit être maintenue pendant au moins 10 min.

Si les conditions d'essai (température) ne peuvent pas être atteintes, le système de refroidissement doit être soumis aux essais à température ambiante à 1,5 fois la pression de service admissible du système de refroidissement.

Il ne doit y avoir ni rupture, ni fracture, ni déformation permanente, ni autre dommage physique du système. Si le système utilise un agent de refroidissement liquide, il ne doit pas se produire de fuite de l'agent de refroidissement au cours de cet essai.

5.7 Caractéristiques assignées de courant continu et de courte durée

Lorsqu'un fabricant spécifie des caractéristiques assignées de courant de courte durée, le module à piles à combustible doit être stabilisé à la valeur de courant assigné, puis le courant doit être augmenté pour atteindre la caractéristique assignée de courant de courte durée définie et il doit être maintenu pendant la durée définie, telle que spécifiée par le fabricant.

Il ne doit y avoir ni rupture, ni fracture, ni déformation permanente, ni autre dommage physique du système.

5.8 Essai de surpression

Lorsque le module à piles à combustible possède un limiteur de pression, la pression doit être augmentée progressivement pour atteindre une valeur qui dépasse la pression de seuil du limiteur de pression. Si cela est nécessaire, le régulateur de la pression d'entrée du module à piles à combustible doit être désactivé ou shunté pour réaliser cet essai. Le mécanisme de sécurité doit déclencher une réduction de la pression ou placer le module à piles à combustible en état de fonctionnement sûr.

Dans le cas d'un modèle qui «fuit avant de se rompre», cet essai peut être destructif et peut être réalisé selon 5.13. Les données de cet essai, ainsi que tous les dangers qui en résultent, doivent être fournies à l'intégrateur du système.

5.9 Essai de rigidité diélectrique

Les modules à piles à combustible peuvent être fabriqués selon deux conceptions différentes:

- a) pile à combustible reliée à la masse/à la terre;
- b) pile à combustible flottante.

Pour la conception a), aucun essai de rigidité diélectrique ne peut être appliqué, seule la tension en circuit ouvert apparaît.

Pour la conception b), l'essai de rigidité diélectrique doit être appliqué à la température de fonctionnement et avec l'agent de refroidissement appliqué. Dans le cas où le module à piles à combustible ne peut pas être maintenu à la température de fonctionnement, l'essai de rigidité diélectrique doit être réalisé à la température maximale admissible et la température doit être enregistrée. Si l'essai de rigidité diélectrique est applicable, il doit être réalisé sur le module à piles à combustible complètement assemblé, celui-ci étant déconnecté de l'alimentation en combustible et purgé avec un gaz prévu à cet effet. La tension d'essai doit être appliquée entre les parties sous tension et les parties métalliques non conductrices. L'essai doit être réalisé avec une tension soit en courant continu, soit en courant alternatif de forme pratiquement sinusoïdale à une fréquence comprise entre 48 Hz et 62 Hz. La tension doit être augmentée régulièrement jusqu'à la valeur spécifiée et maintenue ensuite pendant au moins 5 s. Les résultats sont acceptables s'il n'y a aucun claquage de l'isolation. Le courant de fuite ne doit pas dépasser 1 mA multiplié par le rapport de la tension d'essai sur la tension en circuit ouvert. Si cette valeur ne peut pas être obtenue, les données de cet essai doivent être fournies à l'intégrateur de système. Tous les dangers qui en résultent doivent être limités par l'intégrateur de système.

NOTE En fonction de l'application finale, un essai d'une durée de plus de 5 s pourrait être exigé.

Les tensions d'essai doivent être celles mentionnées au Tableau 1.

Tableau 1 – Tensions pour l'essai de rigidité diélectrique
(dérivées de l'EN 50178)

Colonne 1 Tension en circuit ouvert	Colonne 2 Tension d'essai, CA et CC pour les circuits d'essai avec isolation principale et circuits avec séparation de protection		Colonne 3 Tension d'essai, CA et CC pour les essais entre circuits et surface accessible (non conductrice ou conductrice mais non connectée à la terre de protection)	
	CA valeur efficace kV	CC kV	CA valeur efficace kV	CC kV
$\leq 50 \sqrt{2}$ V = 71 V	0,35	0,5	0,35	0,5
$100 \sqrt{2}$ V = 141 V	0,5	0,7	0,7	1,0
$150 \sqrt{2}$ V = 212 V	0,8	1,1	1,3	1,8
$230 \sqrt{2}$ V = 325 V	1,1	1,6	1,8	2,5
$300 \sqrt{2}$ V = 424 V	1,2	1,7	2,2	3,1
$400 \sqrt{2}$ V = 566 V	1,35	1,9	2,6	3,7
$600 \sqrt{2}$ V = 849 V	1,65	2,3	3,5	5,0
$690 \sqrt{2}$ V = 976 V	1,8	2,5	3,8	5,4
$1 \sqrt{2}$ kV = 1,41 kV	2,25	3,2	5,0	7,1
$1,5 \sqrt{2}$ kV = 2,12 kV	3,0	4,2	6,4	9,1
$3 \sqrt{2}$ kV = 4,24 kV	5,25	7,4	11,2	15,8
$6 \sqrt{2}$ kV = 8,4 kV	9,75	13,8	17,5	24,8
$10 \sqrt{2}$ kV = 14,14 kV	15,75	22,3	34,0	48,1

NOTE L'interpolation est autorisée sur toutes les plages.

5.10 Essai de pression différentielle

Pour les modules à piles à combustible qui maintiennent différents circuits pour l'anode et la cathode à l'intérieur du module, l'essai différentiel est applicable. Le module à piles à combustible doit être à la température maximale ou minimale de fonctionnement, en prenant celle qui est la plus sévère. Le module à piles à combustible doit être mis sous pression progressivement avec un gaz approprié soit sur les circuits de l'anode soit sur les circuits de la cathode et il doit être maintenu sous pression pendant une période comprise entre au moins 1 min et une valeur qui ne soit pas inférieure à 1,3 fois la pression de service différentielle admissible. Si les conditions d'essai ne peuvent pas être obtenues, le module à piles combustible peut être soumis à essai, à la température ambiante, qui ne soit pas inférieure à 1,5 fois la pression de service admissible.

Le débit de fuite doit être mesuré par exemple avec un débitmètre, soit en continu au cours de l'essai, soit, si cela n'est pas possible, avant et après la pressurisation à la pression de service différentielle admissible.

Le module à piles à combustible ne doit subir ni rupture, ni fracture, ni déformation permanente, ni autre dommage physique. Le débit de fuite entre le côté anode et le côté cathode ne doit pas augmenter en fonction du résultat de cet essai et il doit être dans les limites de la spécification du fabricant pour la température de l'essai. Les mesures après la mise sous pression ne doivent pas s'écarter des résultats initiaux de plus de la précision et de la répétabilité à la fois de l'instrumentation et du montage d'essai. Cet essai peut être omis

si de par la conception, il n'est pas possible d'exercer une pression différentielle excessive sur les piles.

5.11 Essai de fuite de gaz (répétition)

Le module à piles à combustible doit faire l'objet d'un nouvel essai de fuite sans période de pré-conditionnement mais aux mêmes conditions d'essai que celles spécifiées en 5.3.

Le débit de fuite du gaz ne doit pas dépasser celui spécifié par le fabricant et ne doit pas varier de plus de 10 % de la valeur initiale ou 5 cm³/min, en prenant celle des deux valeurs qui est la plus élevée.

5.12 Fonctionnement normal (répétition)

L'essai de fonctionnement normal doit être répété comme cela est défini en 5.3. Les mesures enregistrées doivent s'inscrire dans les limites des écarts assignés tel qu'exigé en 5.3.

5.13 Essai de concentration inflammable

Cet essai n'est applicable qu'aux systèmes sous enveloppe avec processus de ventilation et de purge de sécurité intégrés, lorsque la température de fonctionnement est inférieure à la température d'auto-inflammation du gaz combustible.

Les processus de ventilation et de purge de sécurité dépendent des caractéristiques et des exigences spécifiques du module à piles à combustible. Cet essai doit déterminer la concentration maximale de gaz inflammable à l'intérieur de l'enveloppe du module dans les conditions normales de fonctionnement.

Le module à piles à combustible doit être mis en fonctionnement dans les limites de la plage nominale de températures jusqu'à l'obtention des conditions d'équilibre thermique. Les essais doivent être réalisés à la pression barométrique dans la station d'essai et dans une zone exempte de tout courant d'air significatif.

L'enveloppe du module à piles à combustible doit être prévue pour le débit de ventilation spécifié (voir 7.4).

Quatre mesures doivent être réalisées à distance de la purge ou des points d'échappement de manière à ce que la concentration inflammable mesurée soit celle du compartiment plutôt que celle de la source.

L'essai doit être continué jusqu'à ce que quatre mesures consécutives aient montré que l'augmentation de la concentration inflammable ne dépasse pas de plus de 5 % la moyenne des quatre mesures.

L'intervalle de temps entre les mesures ne doit pas être inférieur à 30 min.

Cet essai doit être réalisé au moins deux fois.

L'essai est satisfaisant si la concentration de gaz inflammable est inférieure à 25 % de la limite d'inflammabilité basse. Lorsque la concentration dépasse 25 % de la limite d'inflammabilité basse, les dispositions de 4.2.9 doivent s'appliquer.

5.14 Essais en conditions anormales

5.14.1 Généralités

Les essais type en conditions anormales de fonctionnement sont destinés à démontrer que lesdites conditions, qui peuvent être prévues, ne donnent pas lieu à un danger ou un

dommage à l'extérieur du module à piles à combustible. En raison des conditions anormales, ces essais peuvent être destructifs et il convient qu'ils soient réalisés à la suite des essais de type «en conditions normales». Il est également acceptable de réaliser ces essais sur un sous-module d'un module à piles à combustible, qui générera des réponses ayant une valeur de prototypes. La séquence des essais en conditions anormales peut être différente d'un type à l'autre de module à piles à combustible; la séquence doit être établie en tenant compte du danger croissant de destruction des différents articles d'essai.

Les essais en conditions anormales doivent être réalisés dans l'installation d'essai telle qu'elle est utilisée pour les essais de type. L'installation d'essai peut être modifiée afin d'atteindre les conditions anormales prévues.

Pendant les essais en conditions anormales, la température maximale de surface de l'unité d'essai qui est obtenue doit être enregistrée. Si cette température est supérieure à celle obtenue en conditions normales, elle doit être donnée au fabricant du produit fini.

Le mode de défaillance du module à piles à combustible ne doit pas entraîner de danger pour les personnes ou des dommages à l'extérieur du module, comme indiqué au 5.14.1 – 5.14.6 pour les divers scénarios de conditions anormales. La protection contre les conditions anormales peut être assurée soit par l'intermédiaire des contrôles de protection du module à piles à combustible, soit par les mécanismes de protection fournis dans l'application finale. Dans ce dernier cas, une documentation doit être fournie afin d'alerter l'intégrateur de la nécessité d'assurer une protection et de définir le type de protection nécessaire. Si un échantillon d'essai est endommagé au cours de l'essai en conditions anormales, les essais suivants doivent être réalisés en utilisant un échantillon d'essai qui a déjà subi avec succès l'essai type de 5.3.

Si le module à piles à combustible s'arrête à cause d'une fonction de dégradation de performances (fonction de contrôle non liée à la sécurité), l'essai doit alors être répété et la fonction de contrôle non liée à la sécurité doit être shuntée de façon que le "dispositif de sécurité fourni" arrête le processus avant l'apparition de toute situation dangereuse.

5.14.2 Essai de sous-alimentation en combustible

Le module à piles à combustible doit être mis en fonctionnement à la puissance nominale et avec les paramètres normaux de fonctionnement en régime stable. Afin de provoquer la sous-alimentation en combustible, le flux de combustible est abaissé jusqu'à un niveau représentant le scénario du cas le plus défavorable déterminé par une évaluation de risques fournie par le fabricant du module à piles à combustible. Le système de surveillance de tension ou un autre système de sécurité doit fournir un signal destiné à placer le module à piles à combustible en état sûr avant d'atteindre une condition dangereuse.

5.14.3 Essai de sous-alimentation en oxygène/oxydant

Le module à piles à combustible doit être mis en fonctionnement à la puissance nominale et avec les paramètres normaux de fonctionnement en régime stable. Afin de provoquer la sous-alimentation en oxygène/oxydant, le flux d'oxydant est abaissé jusqu'à un niveau représentant le scénario du cas le plus défavorable déterminé par une évaluation de risques fournie par le fabricant du module à piles à combustible. Le système de surveillance de la tension ou un autre système de sécurité doit fournir un signal destiné à placer le module à piles à combustible en état sûr avant d'atteindre une condition dangereuse.

5.14.4 Essai de court-circuit

Le module à piles à combustible doit être mis en fonctionnement à la puissance nominale et avec les paramètres normaux de fonctionnement en régime stable. Ensuite, un court-circuit entre le pôle plus et le pôle moins du module à piles à combustible avec une résistance et une inductance minimales doit être initié par un commutateur à haute intensité adapté. Le courant et la tension de court-circuit doivent être mesurés par des moyens adaptés, par exemple par un dispositif de surveillance de l'intensité et de la tension d'impulsion/transitoire

pré-déclenché pour mesurer les deux valeurs. Ces données, ainsi que tous les dangers qui en résultent, doivent être fournis à l'intégrateur système.

L'essai de court-circuit peut être réalisé sur un module à échelle réduite avec un calcul approprié pour le produit en vraie grandeur.

5.14.5 Essai de manque de refroidissement/de défaut de refroidissement

Le module étant à la puissance maximale admissible spécifiée par le fabricant, tout en fonctionnant dans les conditions stabilisées spécifiées par le fabricant, le flux du fluide de refroidissement, s'il est séparé de l'oxydant, est stoppé brutalement afin de simuler une défaillance du système de refroidissement. On fait fonctionner le module à piles à combustible:

- soit pendant la durée admissible indiquée par le fabricant après arrêt de l'agent de refroidissement; soit
- le module à piles à combustible s'arrête à cause des dégradations de performance subies avant d'atteindre la température de service des matériaux de construction; soit
- jusqu'à ce que le dispositif de sécurité du module à piles à combustible fournisse un signal destiné à initier le placement en état sûr du module avant d'atteindre une condition dangereuse.

5.14.6 Essai du système de surveillance de perméation

Cet essai n'est applicable qu'aux modules à piles à combustible équipés d'un système de surveillance.

Lorsqu'une perméation entre l'anode et la cathode donne lieu à une condition dangereuse, elle doit être surveillée de manière continue par un dispositif de surveillance de la tension des cellules ou des moyens équivalents pour mettre le module dans un état présentant toutes les conditions de sécurité.

L'essai doit être réalisé dans les conditions normales de fonctionnement. Une perméation doit être simulée en réduisant la tension surveillée de la pile en dessous du seuil inférieur de coupure. Cette procédure doit être répétée avec au moins 2 % de voies de surveillance de tension de pile choisies de manière aléatoire.

NOTE 1 Cela peut être réalisé en utilisant un diviseur de tension entre les bornes de tension de la pile et l'entrée du dispositif de surveillance de la tension de la pile. La résistance à basse tension du diviseur de tension peut être un potentiomètre avec lequel la tension est abaissée de manière continue jusqu'à ce que la condition de coupure soit atteinte.

NOTE 2 Une puissance inverse de l'état d'électrolyse peut intervenir à l'intérieur de la cellule élémentaire si une tension excessive est appliquée, par exemple en raison de la défaillance du système. Cela peut conduire à la formation d'hydrogène et d'oxygène et présenter un danger.

5.14.7 Essais de cycle de gel/dégel

Cet essai n'est applicable qu'aux modules à piles à combustible de type PEFC acceptant une température de stockage ou de fonctionnement inférieure à 0 °C.

Après avoir fonctionné normalement de manière stable, le module à piles à combustible doit être arrêté. On fait ensuite geler le module à piles à combustible dans les conditions présentant la température ambiante la plus faible pour laquelle le dispositif est spécifié par le fabricant. Après avoir gelé, l'unité est dégelée conformément à la spécification du fabricant jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur minimale de 10 °C. Ce cycle de gel/dégel est répété dix fois. Ensuite, l'essai de fuite doit être répété.

NOTE Sous réserve que les résultats d'essai n'en soient pas affectés, l'isolation thermique peut être retirée des modules à piles à combustible afin de réduire le temps de cycle de gel/dégel.

6 Essais individuels de série

6.1 Généralités

Les essais individuels de série doivent être réalisés dans une installation d'essai qui simule le système à piles à combustible escompté ou le système à piles à combustible lui-même de manière à obtenir les conditions de fonctionnement exigées. Il est recommandé de réaliser les essais individuels de série dans l'ordre décrit ci-dessous.

Dans le cas où les essais individuels de série sont réalisés directement avec la procédure de démarrage et de conditionnement initiale, le module à piles à combustible doit être connecté à l'installation de conditionnement et se trouve dans les conditions de fonctionnement spécifiées par le fabricant. Sinon, le module à piles à combustible doit être intégré dans un système à piles à combustible ou un simulateur de système comme cela est défini ci-dessus et la procédure de démarrage doit être réalisée selon la spécification du fabricant, de manière que le module à piles à combustible soit dans des conditions opérationnelles dans la mesure où cela est exigé par les essais individuels de série définis ci-dessous.

Les essais individuels de série suivants doivent être effectués.

6.2 Essai d'étanchéité au gaz

Les essais d'étanchéité au gaz doivent être réalisés sur toutes les unités de production.

Un essai d'étanchéité au gaz doit être réalisé dans les conditions ambiantes sur tous les joints et sur toutes les connexions des composants soumis à des pressions en utilisant un détecteur de fuite de liquide. Il ne doit pas se former de bulles lorsqu'ils sont exposés à la pression maximale de fonctionnement telle qu'elle est définie en 3.16 à une température normale. L'essai doit être réalisé à 1,5 fois le niveau de la pression nominale de fonctionnement.

6.3 Essai de rigidité diélectrique

Les essais de rigidité diélectrique doivent être réalisés sur toutes les unités de production après assemblage.

Les essais de rigidité diélectrique doivent être réalisés comme cela est décrit en 5.9 avec une durée d'essai de 1 s à une température normale.

NOTE En fonction de l'application finale, un essai d'une durée de plus de 1 s pourrait être exigé.

7 Marquages et instructions

7.1 Plaque signalétique

Une plaque signalétique doit être fixée de manière permanente sur le module à piles à combustible. Le marquage sur la plaque signalétique doit être lisible et durable en tenant compte des éventuelles conditions de corrosion chimique, de chaleur et d'environnement.

Le marquage de la plaque signalétique doit inclure au moins les informations suivantes:

- a) le nom du fabricant ou sa marque déposée;
- b) l'identification du modèle;
- c) un code de date ou un numéro de série permettant de retrouver la date de fabrication.

7.2 Marquage

Si des connexions peuvent être interchangeables et donner lieu à des conditions n'offrant pas toute sécurité, celles-ci doivent être identifiées. La polarité des connexions électriques et la mise à la masse, si cela est applicable, doivent être indiquées.

7.3 Etiquette d'avertissement

Les étiquettes d'avertissement suivantes doivent être utilisées selon le cas:

- danger de chocs;
- températures élevées;
- gaz ou liquide inflammables;
- milieux corrosifs;
- milieux toxiques.

Si des tensions élevées peuvent apparaître, une étiquette «Court-circuiter avant toute manipulation» doit être apposée sur le module à piles à combustible.

7.4 Documentation

7.4.1 Généralités

Les informations nécessaires pour l'intégration des systèmes, l'installation, l'exploitation et la maintenance des modules à piles à combustible doivent être fournies sous la forme de dessins, de schémas, de graphiques, de tableaux et d'instructions.

Le fabricant de module à piles à combustible doit assurer que la documentation technique spécifiée dans cet article est fournie avec chaque module à piles à combustible, sans accord contraire entre l'intégrateur de système et le fabricant de module.

Pour les références aux documents indiqués ci-dessus, le fabricant de module à piles à combustible doit choisir une des méthodes suivantes:

- chacun des documents ci-dessus doit mentionner en correspondance les références des autres documents; ou
- tous les documents doivent faire l'objet d'une liste avec leurs références et leur titre dans un dessin ou dans une liste de documents.

La première méthode doit uniquement être utilisée lorsque la documentation comprend un nombre peu important de documents (par exemple moins de cinq).

Les informations supplémentaires suivantes doivent être fournies à l'intégrateur de système:

- a) stratégie de sécurité générale selon 4.1;
- b) type de combustible et d'oxydant, sortes de combustibles et d'oxydants acceptables (composition des gaz, teneur en impuretés, etc.);
- c) pression d'alimentation en combustible et en gaz oxydant (minimale et maximale);
- d) consommation de combustible et d'oxydant à la puissance assignée et à la puissance maximale;
- e) débit maximal de fuite du combustible;
- f) température d'alimentation acceptable du combustible et de l'oxydant;
- g) température maximale d'évacuation;
- h) émissions types;
- i) plage de températures ambiantes et d'humidité pour le fonctionnement et le stockage;
- j) plage d'altitudes;

NOTE La puissance de sortie dépend de la disponibilité de l'oxydant. Le fonctionnement à haute altitude peut réduire les performances.

- k) niveaux admissibles de chocs et de vibrations;
- l) température normale de fonctionnement du module;
- m) température maximale de surface;
- n) sortes de fluides de refroidissement;
- o) points de réglage de température en entrée et en sortie de fluide de refroidissement;
- p) pression d'alimentation en fluide de refroidissement et plage de débit de flux;
- q) type et caractéristiques des dispositifs de protection contre les surintensités/ surcharges/ surtensions/minimums de tension et autres dispositifs de protection;
- r) exigences de débit de purge et de ventilation;
- s) dimensions;
- t) masse;
- u) caractéristiques électriques assignées en sortie (tension assignée, courant assigné, puissance assignée, tension en circuit ouvert avec courant de pleine charge);
- v) surcharge électrique maximale;
- w) alimentation en courant auxiliaire (par exemple, tension, fréquence, puissance);
- x) utilisation du ou des produits finaux pour lesquels ce composant est prévu;
- y) l'emplacement de la connexion à la terre;
- z) informations appropriées concernant les procédures de fin de vie.

Il convient que les exigences réglementaires pour le recyclage et la mise au rebut soient prises en compte.

7.4.2 Manuel d'installation

Le manuel d'installation doit donner une description claire et complète de l'installation et du montage, des connexions électriques, de la connexion du combustible, de la connexion de l'oxydant et de la connexion au système de refroidissement, si cela est applicable, du module à piles à combustible.

Le manuel d'installation doit comprendre:

- la manipulation, le transport et le stockage;
- la préparation;
- l'orientation (emplacement de la face supérieure et de la face inférieure, etc.);
- la méthode de fixation du module;
- la méthode de connexion des tuyauteries de gaz et d'agent de refroidissement;
- la méthode de connexion de la ligne électrique et des capteurs;
- les notes générales et les manipulations interdites;
- le ou les schémas d'ensemble (de blocs) le cas échéant;
- le ou les schémas de circuit.

7.4.3 Schéma d'installation

7.4.3.1 Généralités

Le schéma d'installation doit donner toutes les informations nécessaires aux travaux préliminaires de mise en place du module à piles à combustible. Dans des cas complexes, il peut être nécessaire de se reporter aux dessins d'assemblage pour les informations détaillées.

L'emplacement et le type recommandés des accessoires d'alimentation, des câbles, des tuyaux et assimilés pour leur installation sur site doivent être clairement indiqués.

Les données nécessaires au choix du type, des caractéristiques, des caractéristiques assignées et du réglage de tout dispositif de protection à installer doivent être indiquées.

La taille, le type et l'objet des conduits, des caisses ou des supports entre le module à piles à combustible et l'équipement associé qui doivent être fournis par l'utilisateur doivent être donnés en détails.

Lorsque cela est nécessaire, le schéma doit indiquer où se situe un besoin d'espace pour le retrait ou l'entretien du module à piles à combustible.

De plus, dans les cas où cela est approprié, un schéma ou une table d'interconnexion doit être fourni(e). Ce schéma ou ce tableau doit donner toutes les informations concernant les connexions externes.

7.4.3.2 Schéma de blocs (système) et schémas fonctionnels

Lorsqu'il est nécessaire de faciliter la compréhension des principes de fonctionnement, un schéma de blocs (de système) doit être fourni. Un schéma de bloc (système) représente symboliquement le module à piles à combustible avec ses interrelations fonctionnelles sans nécessairement représenter toutes les interconnexions.

Les schémas fonctionnels peuvent être utilisés soit en tant que partie, soit en plus du schéma de blocs (de système).

7.4.3.3 Schémas de circuit

Lorsqu'un schéma de blocs (système) ne détaille pas suffisamment les éléments du module à piles à combustible, des schémas détaillés des différents circuits doivent être fournis. Ces schémas doivent montrer les circuits sur le module à piles à combustible et ses équipements associés. Tout symbole graphique qui n'est pas représenté dans la CEI 60617 doit être représenté et décrit séparément sur les schémas ou les documents d'accompagnement. Les symboles et l'identification des composants et des dispositifs doivent être cohérents dans tous les documents et sur le module à piles à combustible.

Lorsque cela est approprié, un schéma représentant les bornes, les jonctions et les éléments analogues pour les connexions d'interface doit être fourni. Ce schéma peut être utilisé conjointement au(x) schéma(s) des circuits dans un souci de simplification. Le schéma doit contenir une référence au schéma de circuit détaillé de chaque unité représentée.

Les circuits doivent être représentés de manière à faciliter la compréhension de leur fonction ainsi que leur maintenance. Les caractéristiques concernant la fonction des dispositifs et composants de contrôle, si elles ne sont pas évidentes d'après leur représentation symbolique, doivent être incluses sur les schémas à proximité immédiate du symbole ou renvoyées à une note.

7.4.4 Manuel d'utilisation

La documentation technique doit contenir un manuel d'utilisation donnant le détail des procédures correctes pour le montage et l'utilisation du module à piles à combustible. Une attention particulière doit être accordée aux mesures de sécurité fournies et aux méthodes incorrectes d'utilisation qui peuvent être prévues.

Lorsque le fonctionnement du module à piles à combustible peut être programmé, des informations détaillées concernant les méthodes de programmation, les équipements nécessaires, la vérification des programmes et les procédures supplémentaires de sécurité (le cas échéant) doivent être fournies.

Le manuel d'utilisation doit comprendre:

- la procédure de démarrage et d'utilisation;
- l'ordre des opérations;
- la fréquence des inspections;
- les procédures d'arrêt normal et d'urgence;
- la procédure de stockage et de conditionnement;
- les notes générales et les opérations interdites;
- les informations sur l'environnement physique (par exemple plage de températures ambiantes pour le fonctionnement, vibrations, niveaux de bruit, contaminants atmosphériques) le cas échéant.

7.4.5 Manuel de maintenance

La documentation technique doit contenir un manuel de maintenance donnant les détails des procédures et intervalles corrects pour les réglages, l'entretien et le contrôle préventif et les réparations. Il convient que les recommandations concernant les enregistrements de maintenance/de service soient données dans ce manuel. Lorsque des méthodes de vérification du fonctionnement correct sont données (par exemple logiciels d'essai), l'utilisation de ces méthodes doit être détaillée.

Le fabricant de module à piles à combustible doit donner des instructions correctes pour l'élimination et le recyclage des pièces et des composants.

7.4.6 Nomenclature des pièces

La nomenclature des pièces doit contenir, au minimum, les informations nécessaires pour la commande des pièces détachées ou de rechange (par exemple composants, dispositifs, logiciels, équipements d'essai, documentation technique) nécessaires pour le fonctionnement normal et la maintenance préventive ou corrective, y compris celles qui font l'objet d'une recommandation de stock pour l'utilisateur du module à piles à combustible.

Cette nomenclature doit donner pour chaque élément:

- la désignation de référence utilisée dans la documentation;
- sa désignation de type;
- le fournisseur et des sources alternatives s'il en existe;
- ses caractéristiques générales, le cas échéant.

Annexe A (informative)

Informations supplémentaires pour la réalisation et l'évaluation des essais

A.1 Estimation du débit de fuite d'un système lors d'essais avec un gaz autre que le gaz de service

A.1.1 Généralités

Si le fabricant du module à piles à combustible ne conduit pas l'essai de débit de fuite de gaz avec le gaz de service, le débit de fuite du gaz de service doit être estimé à partir du débit de fuite obtenu avec le gaz utilisé pour les essais (gaz d'essai).

Il est établi que le débit de fuite des liquides et des gaz est inversement proportionnel à la racine carrée de la densité [13]. C'est-à-dire que:

$$\text{débit de fuite proportionnel à } (1/D)^{1/2} \quad (\text{A.1})$$

où D est la densité.

Pour les gaz denses, étant donné que D est le dénominateur, le débit de fuite est faible et pour les gaz légers, le débit de fuite est élevé. On peut en conclure que le débit de fuite d'un gaz léger comme l'hydrogène, par exemple, est supérieur à celui avec un gaz plus lourd comme l'air, dans la mesure où l'hydrogène a une densité bien plus faible que l'air. La densité spécifique de l'hydrogène est de 0,068 et la densité spécifique de l'air de 1.

De même, le débit de fuite volumétrique est inversement proportionnel à la viscosité absolue [13]. C'est-à-dire que:

$$\text{débit de fuite proportionnel à } (1/\mu) \quad (\text{A.2})$$

où μ est la viscosité absolue.

La viscosité dynamique est également désignée sous le terme de viscosité absolue.

Cela signifie que les gaz visqueux fuient moins que les gaz à faible viscosité. La viscosité de l'air, par exemple, est supérieure à celle de l'hydrogène et, pour cette raison, l'hydrogène fuit plus dans des conditions de température et de pression identiques.

Pour trouver quel mode est applicable pour un système particulier, une expérience doit être conduite.

En estimant le rapport du débit de fuite, lorsqu'on utilise le gaz combustible, sur le débit de fuite lorsqu'on utilise l'agent d'essai gazeux, si le débit de fuite avec le gaz d'essai est connu, le débit de fuite avec le gaz de service peut être estimé. Ce rapport peut être appelé R . A savoir:

$$R = \text{débit de fuite du gaz combustible} / \text{débit de fuite du gaz d'essai} \quad (\text{A.3})$$

A.1.2 Calcul de R en utilisant la Formule (A.1)

D'après la Formule (A.1), le débit de fuite des gaz est inversement proportionnel à la racine carrée de leur densité. Ainsi, en substituant la Formule (A.1) dans la Formule (A.3), R est la racine carrée de l'inverse de la densité du gaz d'essai sur le rapport de densité du combustible. De même, étant donné que la densité spécifique est le rapport de la densité du gaz sur la densité de l'air, R est le suivant:

$$R = ((1/FGSG)/(1/TGSG))^{1/2} \quad (A.3)$$

où

$FGSG$ est la densité spécifique du gaz combustible;

$TGSG$ est la densité spécifique du gaz d'essai.

Cela peut être simplifié comme suit:

$$R = (TGSG/FGSG)^{1/2} \quad (A.4)$$

En faisant ainsi, si le gaz combustible est plus léger que le gaz d'essai, R sera plus grand que un et vice versa.

A.1.3 Calcul de R en utilisant la Formule (A.2)

Le rapport du débit de fuite du gaz combustible sur le gaz d'essai en utilisant la Formule (A.2) et en la plaçant dans la Formule (A.3) est le suivant:

$$R = (1/\mu_{fuel})/(1/\mu_{test})$$

ainsi,

$$R = \mu_{test}/\mu_{fuel} \quad (A.5)$$

où

μ_{test} est la viscosité absolue du gaz d'essai;

μ_{fuel} est la viscosité absolue du gaz combustible.

C'est pourquoi, si le gaz combustible est moins visqueux que le gaz d'essai, R sera supérieur à un et vice versa (la Formule (A.5) provient de [13]).

A.1.4 Exemples

Si la Formule (A.4) est utilisée, c'est-à-dire

$$R = (TGSG/FGSG)^{1/2}$$

- a) si l'hydrogène est le gaz d'essai ainsi que le combustible, R est égal à un;
- b) si l'air est utilisé comme agent d'essai pour une pile à combustible qui utilisera de l'hydrogène comme combustible, R sera $(1/0,068)^{1/2} = 3,83$.

Cela signifie que si un débit de fuite de 28,3 l/h (1 ft³/h) est obtenu lorsqu'on fait les essais avec l'air, on estime que le débit de fuite avec l'hydrogène serait de 108 l/h (3,83 ft³/h).

Une analyse similaire peut être conduite si la Formule (A.5) est utilisée pour R . Si l'air est l'agent d'essai gazeux et l'hydrogène le combustible, on a la viscosité absolue (viscosité dynamique) de l'air à 300 K et à la pression atmosphérique [14] qui est de:

$$1,846 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s},$$

la viscosité absolue (viscosité dynamique) de l'hydrogène à 300 K et à la pression atmosphérique [14] qui est de:

$$8,963 \times 10^{-6} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$$

Ainsi, $R = 2,06$.

C'est pourquoi, étant donné que la viscosité de l'hydrogène est inférieure à celle de l'air, il tendra à fuir plus selon un facteur de 2,06.

La viscosité dynamique des gaz est essentiellement liée à la température et elle est essentiellement indépendante de la pression [15]. Différentes valeurs de viscosité dynamique sont données au Tableau A.1 pour quelques gaz.

Si aucune expérience n'est conduite pour trouver quel mode de fuite un système particulier présente, le scénario du cas le plus défavorable peut être utilisé.

Les résultats de ces calculs sont donnés pour le cas où la température du gaz d'essai et la pression sont les mêmes que la température et la pression du gaz de service.

Il est recommandé d'utiliser l'hélium comme gaz d'essai pour les modules à piles à combustible qui fonctionnent à l'hydrogène.

Pour ce cas, la formule est:

$$R = (H_e SG / H_2 SG)^{1/2}$$

où

$H_e SG$ est la densité spécifique de l'hélium = 0,142*;

$H_2 SG$ est la densité spécifique de l'hydrogène = 0,069 5*;

NOTE "*" signifie "à la pression atmosphérique et à 300 K".

ou

$$R = \mu_{\text{test}} / \mu_{\text{fuel}} \quad (\text{A.6})$$

où

μ_{test} est la viscosité absolue du gaz d'essai;

μ_{fuel} est la viscosité absolue du gaz combustible.

A.1.5 Conclusion

La procédure suivante peut être utilisée pour estimer le débit de fuite du gaz de service lorsqu'on effectue l'essai de débit de fuite avec l'hélium comme gaz d'essai. L'estimation obtenue avec cette procédure concernera le gaz de service soumis aux mêmes conditions de température et de pression que pour l'essai de débit de fuite avec l'hélium. Il convient de calculer le rapport du débit de fuite, R , entre le gaz de service et l'hélium et il convient de le multiplier par le débit de fuite obtenu en utilisant l'hélium. Il convient d'utiliser deux formules pour calculer R et le scénario du cas le plus défavorable utilisé (valeur supérieure). Si l'hydrogène est le gaz de service, les formules sont les suivantes:

$$R = (H_e SP / H_2 SP)^{1/2}$$

où

$H_e SP$ est la densité spécifique de l'hélium = 0,142*;

$H_2 SP$ est la densité spécifique de l'hydrogène = 0,0695*.

NOTE “*” signifie “à la pression atmosphérique et à 300 K”.

Pour les autres gaz de service, il convient que H_2SP soit remplacé par la densité spécifique réelle du gaz de service à la pression atmosphérique et à 300 K:

$$R = \mu_{\text{test}} / \mu_{\text{fuel}}$$

où

μ_{test} est la viscosité absolue du gaz d'essai;

μ_{fuel} est la viscosité absolue du gaz combustible.

La viscosité absolue, qui est très dépendante de la température mais pas de la pression, peut être obtenue à partir du Tableau A.1.

Tableau A.1 – Viscosité des gaz à une atmosphère^a

Température °C °F	0 32	20 68	60 140	100 212	200 392	400 752	600 1 112	800 1 472	1 000 1 832
Gaz μ (lbf · s)/(ft ²) [47,88 (N · s)/(m ²)] × 10 ⁸									
Air ^b	35,67	39,16	41,79	45,95	53,15	70,42	80,72	91,75	100,8
Dioxyde de carbone ^b	29,03	30,91	35,00	38,99	47,77	62,92	74,96	87,56	97,71
Monoxyde de carbone ^b	34,60	36,97	41,57	45,96	52,39	66,92	79,68	91,49	102,2
Hélium ^b	38,85	40,54	44,23	47,64	55,80	71,27	84,97	97,43	–
Hydrogène ^{b,c}	17,43	18,27	20,95	21,57	25,29	32,02	38,17	43,92	49,20
Méthane ^b	21,42	22,70	26,50	27,80	33,49	43,21	–	–	–
Azote ^{b,c}	34,67	36,51	40,14	43,55	51,47	65,02	76,47	86,38	95,40
Oxygène ^c	40,08	42,33	46,66	50,74	60,16	76,60	90,87	104,3	116,7
^a Les unités utilisées dans ce tableau ne correspondent pas au Système International d'Unités. ^b Calculées à partir des données provenant de [16]. ^c Calculées à partir des données provenant de [17].									

A.2 Recommandation de facteur de sécurité pour l'essai de pression de service admissible

A.2.1 Généralités

Ce qui suit est un bref résumé de ce qui a été trouvé dans certaines normes nord-américaines sur les limiteurs de pression/soupapes de décharge (PRD/PRV). Ces informations ont été utilisées pour décider de la valeur à recommander comme facteur de sécurité pour la pression d'essai de service admissible.

A.2.2 Limiteurs de pression

A.2.2.1 Généralités

Il convient que les limiteurs de pression tels les disques de rupture s'activent entre 90 % et 100 % du réglage, s'ils réagissent à la pression et entre 80 % et 105 %, s'ils réagissent à une combinaison de pression et de température. Ces dispositifs sont également soumis aux essais de pouvoir d'écoulement.

A.2.2.2 Soupapes de décharge

La pression d'ouverture doit être comprise entre 90 % et 105 %. Il convient que la pression d'évacuation maintenue ne dépasse pas de plus de 10 % la pression d'ouverture pour 24,5 kg (54 livres) d'eau/h. Il convient qu'il n'y ait pas d'écarts supérieurs à 5 % dus à l'exposition aux limites de la plage de températures. Il convient qu'il n'y ait pas d'écarts de plus de 5 % dus à 100 cycles de fonctionnement.

A.2.2.3 Soupapes de sûreté

Il convient que la pression de démarrage de décharge ne dépasse pas 110 % de la valeur marquée. Le pouvoir d'écoulement est mesuré à 120 % de la pression de démarrage de la décharge. Il convient que la pression de fermeture ne soit pas inférieure à 65 % de la pression d'ouverture (à l'issue de l'essai du pouvoir d'écoulement). Après les essais temporels, il convient que les pressions de démarrage de décharge et de fermeture ne s'écartent pas de plus de 5 %.

A.2.2.4 Soupapes de décharge hydrostatiques

Il convient que la pression de démarrage initial de décharge soit dans les limites de 5 %.

A.2.3 Termes utilisés

A.2.3.1

soupape de décharge hydrostatique

soupape de décharge de pression déclenchée par la pression hydrostatique d'entrée qui s'ouvre proportionnellement à l'augmentation de la pression par rapport à la pression d'ouverture

A.2.3.2

pression de tarage

valeur de la pression statique croissante à laquelle le disque se déplace dans la direction d'ouverture à un débit plus rapide par rapport au mouvement correspondant à des pressions supérieures ou inférieures; ne s'applique qu'aux soupapes de sûreté sur fluide compressible

A.2.3.3

soupape de sûreté

soupape de décharge qui est activée par la pression statique d'entrée et qui est caractérisée par l'action rapide d'ouverture ou de tarage

Note 1 à l'article: L'ANSI/CSANGV2-2000 [18] comporte l'article suivant:

«L'efficacité des limiteurs de pression doit être démontrée conformément à la section 18.9 (Essai de tenue au feu)».

Les essais de tenue au feu sont conçus pour démontrer que les réservoirs finis équipés de dispositifs de décharge de pression (PRD) spécifiés dans la conception empêcheront la rupture du conteneur lors d'essais sous certaines conditions de feu spécifiées.

Note 2 à l'article: CGA 12.6-M94 [19] utilise un facteur de sécurité important. Les composants sont soumis aux essais à quatre fois la pression de conception pendant 1 min.

Cette norme ne donne pas d'essai de performance pour les PRD.

Note 3 à l'article: L'efficacité du PRD pour le module à piles à combustible ne peut pas être soumise aux essais dans la mesure où il n'est pas le produit final. Les pressions auxquelles le module pourrait être soumis, dans des situations anormales, ne sont pas connues. En fait, les situations anormales sont inconnues au stade module. La taille et la pression du réservoir de combustible sont inconnues et il pourrait en être de même pour le train de gaz. Ainsi, les essais de performance au niveau du module ne seraient pas représentatifs et l'utilisation de facteurs de sécurité très élevés pourrait avoir un effet restrictif pour la conception.

Note 4 à l'article: La meilleure idée consisterait à ce que le fabricant du module fournisse au moins les informations suivantes à l'utilisateur final:

a) type de PRD/PRV utilisé;

- b) réglage (pression d'ouverture) du PRD/PRV;
- c) pouvoir d'écoulement;
- d) il convient que l'utilisateur final étudie l'efficacité des PRD/PRV du module dans le produit final.

A.2.4 Conclusion

Il est recommandé soit d'utiliser un facteur de sécurité de 132 % (écart de 110 % autorisé par la UL 132 [20] fois 120 % pour une décharge complète) dans la mesure où cela représente le scénario du cas le plus défavorable, soit de le faire dépendre du type de PRD/PRV utilisé. Cela signifie 105 % pour les modules qui utilisent un PRD (la décharge complète est immédiate), évalué selon ANSI/IAS PRD 1-1998 [21] et 132 % pour les modules avec soupapes de décharge de sécurité évaluées selon la UL 132 [20].

A.3 Essais d'acceptation proposés

A.3.1 Essai de fuite

Cet essai n'est pas applicable aux modules à piles à combustible

- dont les températures de fonctionnement sont supérieures à la température d'auto-inflammation du gaz combustible, ou
- dont les piles sont à l'intérieur d'un boîtier étanche au gaz.

La procédure d'essai est la suivante:

Il convient que le module à piles à combustible soit soumis aux essais décrits en 5.2 en utilisant un plan d'échantillonnage pouvant obtenir l'accord du fabricant et de l'organisme d'essai. Il convient que le débit de fuite soit enregistré et qu'il ne dépasse pas la valeur donnée dans la spécification de produit de plus de 5 %.

A.3.2 Fonctionnement normal

Il convient que le module à piles à combustible soit soumis aux essais décrits en 5.3 en utilisant un plan d'échantillonnage pouvant obtenir l'accord du fabricant et de l'organisme d'essai.

A.3.3 Essai de pression de service admissible

Dans le cas où le module à piles à combustible est encapsulé dans un réservoir sous pression déjà agréé selon les réglementations nationales applicables, cet essai n'est pas applicable.

Il convient que le module à piles à combustible soit soumis aux essais décrits en 5.4 en utilisant un plan d'échantillonnage pouvant obtenir l'accord du fabricant et de l'organisme d'essai.

A.3.4 Essai de résistance à la pression du système de refroidissement

Il convient que le module à piles à combustible soit soumis aux essais décrits en 5.5 en utilisant un plan d'échantillonnage pouvant obtenir l'accord du fabricant et de l'organisme d'essai.

A.3.5 Essai de surcharge

Il convient que le module à piles à combustible soit soumis aux essais décrits en 5.6 en utilisant un plan d'échantillonnage pouvant obtenir l'accord du fabricant et de l'organisme d'essai.

A.3.6 Essai de pression différentielle

Il convient que le module à piles à combustible soit soumis aux essais décrits en 5.9 en utilisant un plan d'échantillonnage pouvant obtenir l'accord du fabricant et de l'organisme d'essai.

A.3.7 Contrôles de sécurité

Il convient que le fabricant vérifie que tous les contrôles de sécurité sont tels que spécifiés au cours des essais de type pour toutes les unités fabriquées.

Il convient de prouver que les dispositifs de sécurité du module à piles à combustible sont satisfaisants pour l'application prévue, lorsque cela est possible, en utilisant un plan d'échantillonnage pouvant obtenir l'accord du fabricant et de l'organisme d'essai.

Annexe B (informative)

Liste des notes concernant les conditions particulières dans certains pays

Article/ paragraphe	Note
4.2.1	Au Canada, CAN/CSA C22.2 No. 60529:05 [22] remplace la CEI 60529
4.2.4	Au Canada, si les ensembles à piles à combustible sont contenus dans une enveloppe sous pression fonctionnant au-dessus de 103 kPa, l'enveloppe doit être conforme au document CSA B51 [23].
4.2.9	Au Canada, CAN/CSA-C22.2 No. 60079-0-07 [24] remplace la CEI 60079-10

Bibliographie

- [1] CEI 60050-151:2001, *Vocabulaire Electrotechnique International – Partie 151: Dispositifs électriques et magnétiques*
- [2] CEI 62282-1:2010, *Technologies des piles à combustible – Partie 1: Terminologie*
- [3] CEI 60812, *Techniques d'analyse de la fiabilité du système – Procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)*
- [4] SAE J1739, *Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA), Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA)*
(disponible en anglais seulement)
- [5] CEI 61025, *Analyse par arbre de panne (AAP)*
- [6] CEI 60079-20-1, *Atmosphères explosives – Partie 20-1: Caractéristiques des substances pour le classement des gaz et des vapeurs – Méthodes et données d'essai*
- [7] ISO 37:2005, *Caoutchouc vulcanisé ou thermoplastique – Détermination des caractéristiques de contrainte-déformation en traction*
- [8] ISO 188:2007, *Caoutchouc vulcanisé ou thermoplastique – Essais de résistance au vieillissement accéléré et à la chaleur*
- [9] ISO 1307:2006, *Tuyaux en caoutchouc et en plastique – Dimensions des tuyaux, diamètres intérieurs minimaux et maximaux, et tolérances sur la longueur de coupe*
- [10] ISO 1402:2009, *Tuyaux et flexibles en caoutchouc et en plastique – Essais hydrostatiques*
- [11] ISO 1436:2009, *Tuyaux et flexibles en caoutchouc – Types hydrauliques avec armature de fils métalliques tressés pour fluides à base d'huile ou à base d'eau – Spécifications*
- [12] ISO 4672:1997, *Tuyaux en caoutchouc et en plastique – Essais de souplesse à température inférieure à l'ambiante*
- [13] KALYANAM, K.M. and HAY D.R., *Safety Guide for Hydrogen, National Research Council*
- [14] HOLMAN J.P., *Heat Transfer, Fifth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1981, p.542-543*
- [15] AVALLONE, Eugene A. and BAUMEISTER III Theodore, *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers, tenth edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1996, p.3-32 and 3-33*
- [16] *Handbook of Chemistry and Physics, 52d ed., Chemical Rubber Company, 1971 – 1972*
- [17] *Tables of Thermal Properties of Gases, NBS Circular 564, 1955*
- [18] ANSI/CSANGV2-2000, *Basic Requirements for Compressed Natural Gas Vehicle (NGV) Fuel Containers*
- [19] CGA 12.6-M94, *Vehicle Refueling Appliance*
- [20] UL 132, *Safety Relief Valves for Anhydrous Ammonia and LP-Gas*

- [21] ANSI/IAS PRD 1-1998, *Pressure Relief Devices for Natural Gas Vehicles (NGV) Fuel Containers*
 - [22] CSA C22.2 N° 60529-05-CAN/CSA: *Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*
 - [23] CSA B51-03 (R2007), *Boiler, Pressure Vessel, and Pressure Piping Code*
 - [24] CAN/CSA-C22.2 N° 60079-0-07, *Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres – Part 0: General Requirements*
 - [25] CEI 62282-3-100:2012, *Fuel cell technologies – Part 3-100: Stationary fuel cell power systems – Safety*
(disponible en anglais seulement)
-

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