

TECHNICAL SPECIFICATION

SPECIFICATION TECHNIQUE

Fuel cell technologies –

Part 7-2: Test methods – Single cell and stack performance tests for solid oxide fuel cells (SOFC)

Technologies des piles à combustible –

Partie 7-2: Méthodes d'essai – Essais de performance de cellule élémentaire et de pile pour les piles à combustible à oxyde solide (SOFC)



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2014 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

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

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

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

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

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

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

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

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

TECHNICAL SPECIFICATION

SPECIFICATION TECHNIQUE

Fuel cell technologies –

Part 7-2: Test methods – Single cell and stack performance tests for solid oxide fuel cells (SOFC)

Technologies des piles à combustible –

Partie 7-2: Méthodes d'essai – Essais de performance de cellule élémentaire et de pile pour les piles à combustible à oxyde solide (SOFC)

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX



ICS 27.070

ISBN 978-2-8322-1539-5

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.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms, definitions and symbols.....	9
3.1 Terms and definitions.....	9
3.2 Symbols.....	11
4 General safety conditions	12
5 Cell/stack assembly unit	12
6 Testing system	13
6.1 Subsystems in testing system	13
6.1.1 General	13
6.1.2 Anode gas control subsystem	13
6.1.3 Cathode gas control subsystem	13
6.1.4 Cell/stack assembly unit temperature control subsystem	13
6.1.5 Output power control subsystem	14
6.1.6 Measurement and data acquisition subsystem	14
6.1.7 Safety subsystem	14
6.1.8 Mechanical load control subsystem.....	14
6.1.9 Gas pressure control subsystem for anode and cathode	14
6.1.10 Test system control subsystem.....	14
6.2 Maximum variation in control items of testing system	14
7 Instruments and measurement methods	15
7.1 General.....	15
7.2 Instrument uncertainty.....	15
7.3 Anode gas	15
7.3.1 Anode gas flow rate	15
7.3.2 Anode gas composition.....	16
7.3.3 Anode gas temperature	16
7.3.4 Anode gas pressure.....	17
7.3.5 Anode exhaust gas flow rate.....	17
7.3.6 Anode exhaust gas component	17
7.3.7 Anode exhaust gas temperature	17
7.3.8 Anode exhaust gas pressure.....	17
7.4 Cathode gas	18
7.4.1 Cathode gas flow rate	18
7.4.2 Cathode gas component	18
7.4.3 Cathode gas temperature	18
7.4.4 Cathode gas pressure.....	18
7.4.5 Cathode exhaust gas flow rate.....	18
7.4.6 Cathode exhaust gas component	19
7.4.7 Cathode exhaust gas temperature	19
7.4.8 Cathode exhaust gas pressure	19
7.5 Output voltage	19
7.6 Output current.....	19

7.7	Cell/stack assembly unit temperature	19
7.8	Mechanical load	19
7.9	Total impedance	20
7.10	Ambient condition	20
8	Test preparation	20
8.1	General.....	20
8.2	Standard test condition and test range	20
8.3	Components and impurities of anode gas and cathode gas	21
8.4	Basis of the test procedure	21
8.5	Confirmation of aging condition for unit	21
8.6	Confirmation of criteria of stable state	21
8.7	Data acquisition method.....	21
9	Test procedure	21
9.1	Set-up.....	21
9.2	Initial conditioning	22
9.3	Shut-down	22
10	Performance test	22
10.1	Rated power test.....	22
10.1.1	Objective	22
10.1.2	Test method	22
10.1.3	Presentation of results	22
10.2	Current-voltage characteristics test.....	23
10.2.1	Objective	23
10.2.2	Test method	23
10.2.3	Presentation of results	23
10.3	Effective fuel utilization dependency test	24
10.3.1	Objective	24
10.3.2	Test method	24
10.3.3	Presentation of results	24
10.4	Long term durability test	25
10.4.1	Objective	25
10.4.2	Test method	25
10.4.3	Presentation of results	26
10.5	Thermal cycling durability test.....	26
10.5.1	Objective	26
10.5.2	Test method	26
10.5.3	Presentation of results	27
10.6	Internal reforming performance test	27
10.6.1	Objective	27
10.6.2	Test method	27
10.6.3	Presentation of results	27
10.7	Resistance components identification test.....	27
10.7.1	Objective	27
10.7.2	Test method	28
10.7.3	Presentation of results	28
11	Test report.....	29
11.1	General.....	29
11.2	Report items	29

11.3	Test unit data description	30
11.4	Test condition description	30
11.5	Test data description	30
11.6	Uncertainty evaluation	30
Annex A (informative)	Example of cell assembly unit	31
Annex B (informative)	Calculation of effective fuel utilization	32
B.1	Calculation method	32
B.2	Calculation examples	33
B.2.1	Calculation from anode gas composition and flow-rate	33
B.2.2	Calculation from supplied H ₂ and H ₂ O flow rate	33
Annex C (informative)	Calculation of effective oxygen utilization	34
C.1	Calculation method	34
C.2	Calculation example	34
Annex D (informative)	Maximum width of the voltage hysteresis in <i>I-V</i> characteristic test	36
Annex E (informative)	Current-voltage characteristic test under constant effective fuel utilization	37
Annex F (informative)	Test report (template)	38
F.1	General information	38
F.2	Test unit data description	38
F.3	Test condition	39
F.4	Rated power test	39
F.5	Current-voltage characteristics test	39
F.6	Effective fuel utilization dependency test	40
F.7	Long-term durability test	41
F.8	Thermal cycling durability test	42
F.9	Internal reforming performance test	42
F.10	Resistance components identification test	43
Annex G (informative)	Method for finding instrument uncertainty	44
Bibliography		45
Figure 1	– Testing system	13
Figure 2	– Typical diagram of complex impedance plot for SOFC	29
Figure A.1	– Example of cell assembly unit	31
Figure D.1	– Voltage hysteresis at a given sweep rate in <i>I-V</i> characteristic test	36
Figure E.1	– Example of the record in current-voltage characteristic test under constant effective fuel utilization	37
Table 1	– Symbols	11
Table B.1	– n_j for representative fuels	33
Table B.2	– Anode gas composition, flow rate of each fuel component f_j , and $n_j f_j$	33
Table C.1	– Cathode gas composition, f_{O_2} , and I_{theory}	35

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

FUEL CELL TECHNOLOGIES –

**Part 7-2: Test methods –
Single cell and stack performance tests for solid oxide fuel cells (SOFC)**

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.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical specification when

- the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts, or
- the subject is still under technical development or where, for any other reason, there is the future but no immediate possibility of an agreement on an International Standard.

Technical specifications are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards.

IEC TS 62282-7-2, which is a technical specification, has been prepared by IEC technical committee 105: Fuel cell technologies.

The text of this technical specification is based on the following documents:

Enquiry draft	Report on voting
105/443/DTS	105/498/RVC

Full information on the voting for the approval of this technical specification 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 parts of the IEC 62282 series, under the general title: *Fuel cell technologies*, can be found on the IEC website.

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

- transformed into an International standard,
- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 62282-7-2:2014

INTRODUCTION

This technical specification describes test methods for a single cell and stack (denoted as "cell/stack" hereafter) that is to be employed in power generation systems using solid oxide fuel cells (SOFCs).

SOFCs have a broad range of geometry and size. As such, in general, peripherals like current collectors and gas manifolds are unique to each cell or stack and are often incorporated into a cell or stack to form one integrated unit. In addition, they tend to have a significant effect on the power generation characteristics of the cell or stack. This technical specification therefore introduces as its subject "cell/stack assembly units," which are defined as those units containing not only a cell or stack but also peripherals.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 62282-7-2:2014

FUEL CELL TECHNOLOGIES –

Part 7-2: Test methods – Single cell and stack performance tests for solid oxide fuel cells (SOFC)

1 Scope

This part of IEC 62282, which is a technical specification, provides for SOFC cell/stack assembly units, testing systems, instruments and measuring methods, and test methods to test the performance of SOFC cells and stacks.

This technical specification is not applicable to small button cells that are designed for SOFC material testing and provide no practical means of fuel utilization measurement.

This technical specification is to be used for data exchanges in commercial transactions between cell/stack manufacturers and system developers or for acquiring data on a cell or stack in order to estimate the performance of a system based on it. Users of this technical specification may selectively execute test items suitable for their purposes from those described in this technical specification.

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 60584-1, *Thermocouples – Part 1: EMF specifications and tolerances*

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

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

IEC 61515, *Mineral insulated thermocouple cables and thermocouples*

IEC TS 62282-1:2013, *Fuel cell technologies – Part 1: Terminology*

ISO 4260, *Petroleum products and hydrocarbons – Determination of sulfur content – Wickbold combustion method*

ISO 5168, *Measurement of fluid flow – Procedures for the evaluation of uncertainties*

ISO 6141, *Gas analysis – Requirements for certificates for calibration gases and gas mixtures*

ISO 6142, *Gas analysis – Preparation of calibration gas mixtures – Gravimetric method*

ISO 6143, *Gas analysis – Comparison methods for determining and checking the composition of calibration gas mixtures*

ISO 6145-7, *Gas analysis – Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods – Part 7: Thermal mass-flow controllers*

ISO 6974 (all parts), *Natural gas – Determination of composition with defined uncertainty by gas chromatography*

ISO 7066-2, *Assessment of uncertainty in the calibration and use of flow measurement devices – Part 2: Non-linear calibration relationships*

ISO 8573-1, *Compressed air – Part 1: Contaminants and purity classes*

ISO 8756, *Air quality – Handling of temperature, pressure and humidity data*

ISO 12185, *Crude petroleum and petroleum products – Determination of density – Oscillating U-tube method*

3 Terms, definitions and symbols

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC TS 62282-1, as well as the following terms and definitions, apply.

3.1.1

cell/stack assembly unit

unit including a single cell or stack, as well as gas supply parts, current collector parts, and any other peripherals as required for power generation tests

3.1.2

active electrode area

geometric electrode area upon which an electrochemical reaction occurs

Note 1 to entry: Usually this is the smaller of the anode and cathode areas.

3.1.3

current density

current divided by active electrode area

3.1.4

average cell voltage

cell/stack assembly unit voltage divided by the number of the cells in a series connection in the unit

3.1.5

normal temperature and pressure

NTP

0 °C and 101,325 kPa, respectively

3.1.6

anode gas

gas which is supplied to the inlet of the anode of a single cell/stack assembly unit

Note 1 to entry: Such a gas belongs to one of the following categories:

- pure hydrogen or mixture which contains hydrogen as a principal component with water vapour or nitrogen;
- reformed gas of raw fuel of SOFC such as methane or kerosene premixed with water vapour or air as oxidant;
- simulated gas of reformat which contains hydrogen, water vapour, carbon monoxide, carbon dioxide, methane, nitrogen, etc, as main components;
- methane, alcohols and other raw fuels directly supplied in pure form or mixed with water vapour and/or air.

3.1.7

cathode gas

gas which is supplied to the inlet of the cathode of a single cell/stack assembly unit

Note 1 to entry: Oxygen and nitrogen are its main components.

3.1.8

current collector

conductive material in a fuel cell that collects electrons from the anode side or conducts electrons to the cathode side

3.1.9

stable state

condition of a cell/stack assembly unit at which the unit is stable enough for any controlling parameter and the output voltage or output current of the unit to remain within its tolerance range of variation

3.1.10

theoretical current

current when the supplied anode gas or cathode gas is completely consumed in electrochemical reactions divided by the number of cells in a series connection

3.1.11

effective fuel utilization

ratio of actual output current of the cell/stack assembly unit to the theoretical current

Note 1 to entry: Causes for less-than-optimal currents include losses due to electronic conduction within the cell/stack assembly, gas leaks and anode gas pass-through.

Note 2 to entry: Calculation method of effective fuel utilization is given in Annex B.

3.1.12

effective oxygen utilization

ratio of actual output current of the cell/stack assembly unit to the theoretical current

Note 1 to entry: Calculation method of effective oxygen utilization is given in Annex C.

3.1.13

maximum effective fuel utilization

highest effective fuel utilization that the unit can operate at, without causing unacceptable degradation

Note 1 to entry: The acceptable degradation rate is usually obtained from the developer.

3.1.14

minimum cell/stack assembly unit voltage

lowest cell/stack assembly unit voltage specified by the manufacturer

3.1.15

open circuit voltage

OCV

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

Note 1 to entry: Also known as no-load voltage.

3.1.16

power density

ratio of the power to the active electrode area of a cell/stack assembly unit

Note 1 to entry: Power density is calculated from the voltage multiplied by the current density ($P_d = V \times J$, where J is current density).

3.1.17

total impedance

frequency-dependent losses due to ohmic, activation, diffusion, and concentration effects

3.1.18

total resistance

real part of low-frequency limit of total impedance which is the same as the slope of tangent to I - V curve

3.1.19

stoichiometric ratio

ratio between the number of moles of reactant gas flowing per unit time to that needed by the electrochemical reaction

Note 1 to entry: The terms, “stoichiometric ratio” and “reactant gas utilization,” are related. The reciprocal of the fraction of the gas utilized is the stoichiometric ratio.

3.2 Symbols

Table 1 shows the symbols and units that are used in this technical specification.

Table 1 – Symbols

Symbol	Definition	Unit
a	Error limit specified from specification of instrument	**
f_a	Flow rate of anode gas	l/min (NTP)
f_c	Flow rate of cathode gas	l/min (NTP)
f_j	Flow rate of fuel component j in anode gas	l/min (NTP)
I	Current	A
J	Current density	A/cm ²
n	Number of transferred electrons	
N	Number of cells in a series connection	
p_a	Absolute pressure of anode gas	kPa
p_c	Absolute pressure of cathode gas	kPa
P	Output power	W
P_d	Output power density	W/cm ²
t	Time	s, min, h
T_{op}	Cell/stack assembly unit operating temperature	°C
u_l	Combined standard uncertainty for instruments	**
$u_{l,i}$	Standard uncertainty for instrument i	**
U_f	Effective fuel utilization	%
U_{O_2}	Effective oxygen utilization	%
U_l	Extended instrument uncertainty	**
V	Voltage	V
x_i	Normalized mole fraction of component i	mol %
x_i^*	Non-normalized mole fraction of component i	mol %
ζ_j	Hydrocarbon conversion rate for hydrocarbon component j	%
** Denotes where the unit varies depending on the specification.		

4 General safety conditions

An operating fuel cell uses oxidizing and combustible gases. Typically, these gases are stored in high-pressure containers. The fuel cell itself may be operated at pressures greater than atmospheric pressure. Those who carry out cell/stack assembly unit testing shall be trained and experienced in the operation of test systems and specifically in safety procedures involving electrical equipment and reactive, compressed gases.

The test personnel are responsible for obtaining and following all applicable safety codes and generally accepted engineering practices related to their test system, facility, fuels (with particular attention to compressed gases), and exhaust products.

Materials which are compatible with the use and storage of the reactant gases shall be used during testing. Local safety codes and standards for working with hydrogen, hydrocarbons and carbon monoxide should be followed.

In summary, safely operating a test station requires appropriate technical training and experience as well as safety facilities and equipment, all of which are outside the scope of this technical specification.

5 Cell/stack assembly unit

A cell/stack assembly unit includes a cell or stack, gas supply, current leads, and such other peripherals as required for power generation tests. It shall be provided with single or multiple measuring points for temperature and voltage, and one set of current lead points, all to be specified by the manufacturer.

As shown in Annex A, the boundary of a cell/stack assembly unit goes through the anode gas supply port, cathode gas supply port, temperature measuring point, current lead points, voltage measuring points and mechanical load application points.

Some cell/stack assembly units may have no exhaust port for the anode gas or cathode gas because of the configuration of the cells. In such cases, the gas flow field pattern and its material shall be determined by the method recommended by the manufacturer. The load application method shall be also based on the recommendation of the manufacturer. The maximum operating temperature from the manufacturer shall not be exceeded.

If the components of a cell/stack assembly unit other than a cell/stack are not specified by the manufacturer, the following shall be described in the test report, as a minimum:

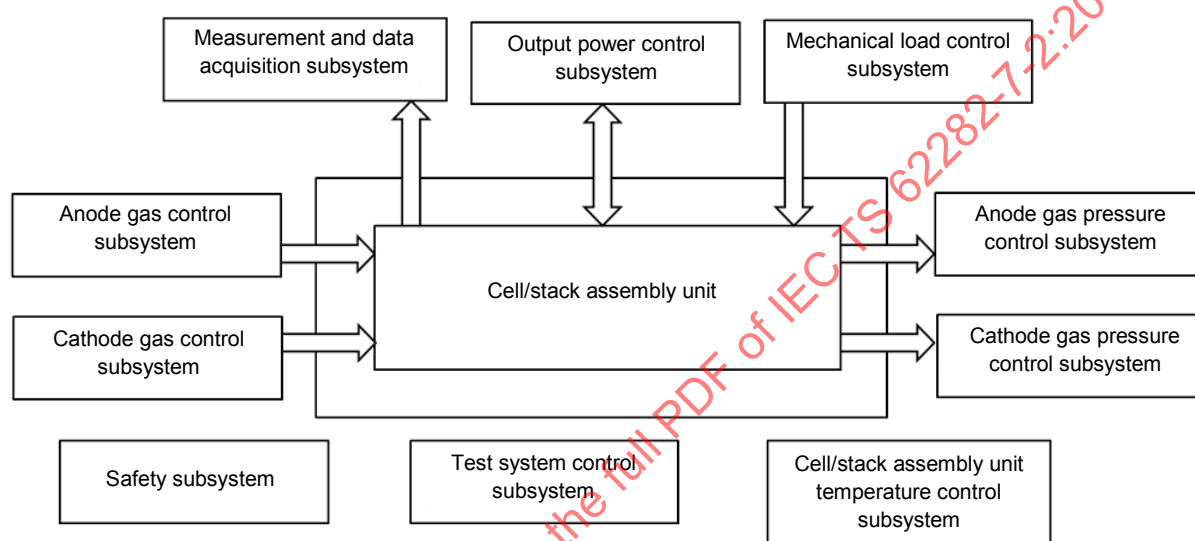
- a) materials and geometry of the peripheral components to be used for testing;
- b) flow patterns and directions of anode and cathode gases;
- c) locations of temperature measurement, mechanical load application, voltage measurement and current leads;
- d) magnitude of the mechanical load;
- e) configuration of assembly unit and its assembling method.

6 Testing system

6.1 Subsystems in testing system

6.1.1 General

As shown in Figure 1, a testing system consists of an anode gas control subsystem, cathode gas control subsystem, cell/stack assembly unit temperature control subsystem, output power control subsystem, measurement and data acquisition subsystem and safety subsystem. It may also include a mechanical load control subsystem, anode gas and cathode gas pressure control subsystem and/or a test system control subsystem that controls the whole testing system, if needed.



IEC 1403/14

Figure 1 – Testing system

6.1.2 Anode gas control subsystem

The anode gas control subsystem controls the flow rate, composition and temperature of anode gas supplied to the cell/stack assembly unit. If the gas composition is to be maintained throughout the piping, then attention shall be paid to the materials, temperature, inner diameter and length of the piping. Where necessary, the piping shall be heated and/or thermally insulated in order to prevent condensation of water vapour.

Care should be taken to avoid other phenomena, such as carbon deposits, and the evaporation and transport of undesired materials in the gas streams, such as chromium.

6.1.3 Cathode gas control subsystem

The cathode gas control subsystem controls the flow rate, composition and temperature of the cathode gas supplied to the cell/stack assembly unit.

Care should be taken to avoid other phenomena, such as the evaporation and transport of undesired materials in the gas streams, such as chromium.

6.1.4 Cell/stack assembly unit temperature control subsystem

The cell/stack assembly unit temperature control subsystem controls, at least, the electric furnace or the unit temperature. It maintains the operating temperature. The electric furnace shall be selected to maintain the temperature distribution within the prescribed tolerance level.

Efforts should be made to minimize the electrical noise that the electric furnace generates while providing heat. It is assumed that all the test systems will use an electrical furnace for simplicity and safety reasons.

6.1.5 Output power control subsystem

The output power control subsystem controls the output current or output voltage of the cell/stack assembly unit.

6.1.6 Measurement and data acquisition subsystem

The measurement and data acquisition subsystem acquires and records the cell/stack assembly unit temperature, current, voltage, anode gas flow rate, cathode gas flow rate, and optionally, environmental conditions (ambient temperature, relative humidity, and atmospheric pressure) by the prescribed method. If necessary, it also acquires and records the mechanical load applied to the cell; the temperature, composition and pressure of cathode gas and the anode gas; the flow rate, composition, temperature and pressure of anode and cathode exhaust gases; and cell/stack assembly unit impedance data, etc., by the prescribed method.

6.1.7 Safety subsystem

The safety subsystem functions as a detector and alarm system for malfunctioning of the test system based on predefined parameters and criteria. If it detects a serious fault, then it shall automatically establish a safe state in the test system. The anode should be purged with an inert gas, such as nitrogen, which could also contain hydrogen at concentrations below the lower flammability limit.

6.1.8 Mechanical load control subsystem

The optional, mechanical load control subsystem regulates the mechanical load that is applied to increase the contact among components in the cell/stack assembly unit. The subsystem should be strong enough to apply the required mechanical load under the test condition and to maintain the load for long term operation.

6.1.9 Gas pressure control subsystem for anode and cathode

The optional, gas pressure control subsystem for anode and cathode gases regulates the pressure of these gases by the use of a backpressure control valve, etc.

6.1.10 Test system control subsystem

The test system control subsystem provides the integrated control for each control subsystem and data acquisition subsystem.

6.2 Maximum variation in control items of testing system

The tolerable variation of each control item in the testing system shall fall within the following ranges:

In the case of current control:	current: ± 1 % relative to rated value point
In the case of voltage control:	voltage: ± 1 % relative to set point
Temperature:	$\pm 1,0$ % relative to set point

NOTE 1 Temperature variation at the set point of less than ± 5 °C will increase reproducibility.

Anode and cathode gas flow rates:	± 1 % relative to rated
Anode gas composition:	$\pm 2,0$ mol % for H_2 , N_2 ; $\pm 2,0$ mol % for CO , CO_2 , CH_4 ;

$\pm 5,0$ mol % for H₂O (water vapour concentration)

In case of bubbler/sparger humidification: Dew point temperature: ± 1 °C

NOTE 2 At water vapour concentrations greater than 10 mol %, a bubbler system (sparger) may cause higher uncertainty.

Cathode gas composition: $\pm 1,0$ mol % of the target O₂ concentration

Where pressures of anode and cathode gases are to be controlled, pressures of anode and cathode gases: ± 1 % of rated condition, when pressure of rated condition is equal to or larger than 0,3 MPa; and 3 kPa, when pressure of rated condition is smaller than 0,3 MPa

7 Instruments and measurement methods

7.1 General

Measuring instruments shall meet the requirement of 7.2. As a minimum, the flow rate and composition of the anode and cathode gases as well as the temperature, voltage, and current of the cell/stack assembly unit shall be measured. Additional measurements shall be taken based on the test parameters and/or test conditions. Some of the following items prescribed in 7.3 or 7.4 may not be measurable in the case of a cell/stack assembly unit having no anode or cathode gas exhaust port.

7.2 Instrument uncertainty

The expanded uncertainty of each measuring instrument (coverage factor $k = 2$) at the time of calibration or that estimated from the class of instrument shall meet the following requirements:

NOTE Coverage factor is defined in ISO/IEC Guide 98-3.

Current:	± 1 % relative to rated
Voltage:	$\pm 0,5$ % relative to OCV
Temperature:	$\pm 1,0$ % of reading
Flow rates of anode and cathode gases:	± 2 % of rated
Pressures of anode and cathode gases:	± 1 % of reading
Anode gas composition:	± 2 mol % for H ₂ , H ₂ O, and N ₂ ; ± 1 mol % for CO, CO ₂ , and CH ₄
Cathode gas composition:	$\pm 0,3$ mol % for O ₂ (balance N ₂)

7.3 Anode gas

7.3.1 Anode gas flow rate

Anode gas flow rate shall be measured using mass flow meters, volumetric flow meters or turbine-type flow meters. The flow meter shall be selected by taking into consideration the species in the supplied gas, the range of flow rates, and the allowable uncertainty of the flow meter. When measurements are made on a volumetric basis, they shall be converted to mass flow rate by measuring the gas temperature and pressure or gas density in the vicinity of the flow meters. Measurement uncertainty for dry gases should be evaluated in accordance with ISO 5168, ISO/TR 7066-1¹ or ISO 7066-2.

¹ Withdrawn.

7.3.2 Anode gas composition

The anode gas composition should be measured when the performance of the cell/stack assembly unit is measured. If this is not possible, however, the anode gas composition shall be measured during the preparation of the performance test under the same conditions as those of the cell performance test.

When anode gas is supplied in one of the following conditions a) to d) below, and if the gas supply line has no reactors, such as a reformer, and is confirmed to insignificantly change the gas composition, composition may be calculated based on the composition table published by the gas supplier and values obtained from each flow meter, in accordance with ISO 6145-7:

- a) a single-composition gas such as hydrogen is supplied;
- b) a mixed gas of known composition is supplied;
- c) anode gas is supplied by mixing component gases in a controlled manner using multiple flow meters;
- d) gases under b) and c) above are supplied in combination.

The anode gas shall be sampled near the anode gas supply port of the cell/stack assembly unit and analysed using an infrared spectroscopy, mass spectrometer, gas chromatograph or similar device. The gas sample shall be transported from its origin to the point of analysis in a manner which minimizes changes in composition. Thus, the material, temperature, diameter and the length of the tubing shall be carefully chosen to minimize the compositional change in the sampling tubing. When necessary, it shall be heated to avoid the condensation of the water vapour.

If water vapour is likely to affect measurement, remove water from the gas sample or dilute the gas sample with argon or similar inert gas.

The result of such analysis for gas component i , expressed as x_i^* (mol %) (non-normalized concentration), shall be normalized to obtain a normalized concentration, x_i (mol %), using the following equation:

$$x_i = 100 \frac{x_i^*}{\sum_w x_w^*} \quad (1)$$

where $\sum_w x_w^*$ represents the sum of non-normalized concentrations of all component gases in the analysis.

The gas analyser shall be calibrated using a standard gas of known mass ratio.

The measurement uncertainty shall be evaluated in accordance with the ISO 6974 series, ISO 6141, ISO 6142, or ISO 6143.

7.3.3 Anode gas temperature

Gas temperature shall be measured near the anode gas supply port of the cell/stack assembly unit by using a thermocouple or sheathed thermocouple and an extension leadwire of a type and class in accordance with IEC 60584-1, IEC 60584-2, IEC 60584-3 or IEC 61515. When there is a reactor such as a reformer, gas temperature at the exit of the reactor should also be measured.

NOTE There can be significant differences between the temperature of the tube wall and the temperature of the bulk gas.

If it is difficult to measure the gas temperature during the cell performance test, the anode gas temperature shall be measured during the preparation of the performance test under the same conditions as those of the performance test.

7.3.4 Anode gas pressure

Anode gas pressure shall be measured upstream of the anode gas supply port of the cell/stack assembly unit by using a calibrated pressure sensor, manometer, Bourdon tube or similar instrument. The measuring instrument shall be located in such a manner that the uncertainty is minimized in consideration of any pressure loss within the piping, piping temperature and other factors. Attention shall be paid to prevent condensation of water vapour during measurement. One way may be to measure the pressure by injecting a very small amount of dry nitrogen gas or similar into the pipe, close to the measuring instrument.

7.3.5 Anode exhaust gas flow rate

The anode exhaust gas flow rate shall be measured using mass flow meters, volumetric flow meters or turbine-type flow meters after implementing a means to prevent water condensation from affecting the stability of anode gas flow or after removing water from the gas flow. When measurements are made on volumetric basis, they shall be converted to mass flow rate by measuring the gas temperature and pressure or gas density in the vicinity of the flow meters. Alternatively, the anode exhaust gas flow rate can be calculated from the component concentrations of the anode exhaust gas, tracer concentration and tracer flow rate by precisely adding a minute amount of a gas that is not contained in the anode exhaust gas as the tracer. The gas analyser shall be calibrated using a standard gas of known mass ratio. Measurement uncertainty shall be evaluated in accordance with the ISO 6974 series, ISO 6141, ISO 6142, or ISO 6143.

The exhaust gas shall be handled with caution for reasons of safety and the environment, since it may still contain hydrogen, carbon monoxide and hydrocarbons.

7.3.6 Anode exhaust gas component

The anode exhaust gas shall be sampled near the anode gas exhaust port of the cell/stack assembly unit. The sample shall be analysed using an infrared spectrophotometer, mass spectrometer, gas chromatograph or similar. If water vapour is likely to affect the measurement, remove water from the gas sample or dilute the sample with argon gas or similar. When measuring, attention shall be paid to the materials, temperature, inner diameter and length of piping in order to ensure that any changes the gas composition may have within the piping are insignificant. In particular, the piping shall be heated where necessary to prevent water vapour from condensing in the piping. The gas analyser shall be calibrated using a standard gas of known mass ratio.

7.3.7 Anode exhaust gas temperature

Gas temperature shall be measured near the anode gas exhaust port of the cell/stack assembly unit by selecting a thermocouple or sheathed thermocouple, and an extension lead wire of the type and class that are appropriate and in accordance with IEC 61515, IEC 60584-1, IEC 60584-2 or IEC 60584-3. If it is difficult to measure the gas temperature during the cell performance test, the anode exhaust gas temperature shall be measured during the preparation of the performance test under the same conditions as those of the performance test.

NOTE There can be significant differences between the temperature of the tube wall and the temperature of the bulk gas.

7.3.8 Anode exhaust gas pressure

Anode exhaust gas pressure shall be measured downstream of the anode gas exhaust port of the cell/stack assembly unit by using a pressure sensor, manometer, Bourdon tube or similar. The measuring instrument should be located in such a manner that the uncertainty is

minimized in consideration of any pressure loss within the piping, piping (gas) temperature and other factors. Attention shall be paid to prevent water vapour from condensing during measurement. One way may be to measure the pressure by injecting a very small amount of dry nitrogen gas or similar into the pipe close to the measuring instrument.

7.4 Cathode gas

7.4.1 Cathode gas flow rate

The cathode gas flow rate shall be measured by using mass flow meters, volumetric flow meters or turbine-type flow meters. When measurements are made on volumetric basis, they shall be converted to mass flow rate by measuring the gas temperature and pressure or gas density in the vicinity of the flow meters. The flow meter shall be selected in consideration of the expected range of flow rates and the allowable uncertainty of the flow meter. Uncertainty shall be evaluated in accordance with ISO 5168, ISO/TR 7066-1² or ISO 7066-2.

7.4.2 Cathode gas component

For cathode gas composition, oxygen concentration shall be measured using a gas chromatograph or an oxygen concentration meter. The cathode gas should consist of clean (oil-free), compressed air or bottled gas. If a bottled gas mixture is used, the values described on its composition certificate published by the gas supplier may be used. The uncertainty of the instrument shall be evaluated in accordance with the ISO 6974 series, ISO 6141, ISO 6142, ISO 6143 or ISO 6145-7.

When it is necessary to measure humidity, a dew point meter, water content meter or gas chromatograph shall be used while controlling the gas temperature to prevent condensation of water vapour.

7.4.3 Cathode gas temperature

Gas temperature shall be measured near the cathode gas supply port of the cell/stack assembly unit by selecting a thermocouple or sheathed thermocouple, and an extension leadwire of the type and class that are appropriate in accordance with IEC 60584-1, IEC 60584-2, IEC 60584-3 or IEC 61515.

NOTE There can be significant differences between the temperature of the tube wall and the temperature of the bulk gas.

If it is difficult to measure the gas temperature during the cell performance test, the cathode gas temperature shall be measured during the preparation of the performance test under the same conditions as those of the performance test.

7.4.4 Cathode gas pressure

Cathode gas pressure shall be measured upstream of the cathode gas supply port of the cell/stack assembly unit by using a pressure sensor, manometer, Bourdon tube, or similar. The measuring instrument should be located in such a manner that the uncertainty is minimized in consideration of any pressure loss within the piping, piping temperature, and other factors.

7.4.5 Cathode exhaust gas flow rate

The cathode exhaust gas flow rate shall be measured using a mass flow meter, volumetric flow meters or turbine-type flow meters after cooling the gas. When measurements are made on volumetric basis, they shall be converted to mass flow rate by measuring the gas temperature and pressure or gas density in the vicinity of the flow meters. The flow meter

² Withdrawn.

shall be selected in consideration of the expected range of flow rates and the allowable uncertainty of the instrument. The uncertainty of the instrument shall be evaluated in accordance with the ISO 6974 series, ISO 6141, ISO 6142, ISO 6143 or ISO 6145-7.

7.4.6 Cathode exhaust gas component

For cathode exhaust gas composition, oxygen concentration shall be measured using a gas chromatograph or an oxygen concentration meter after cooling the gas. When it is necessary to measure extremely low water concentration, a dew point meter, water content meter or gas chromatograph shall be used while controlling the gas temperature to prevent condensation of water vapour.

7.4.7 Cathode exhaust gas temperature

The cathode exhaust gas temperature shall be measured near the cathode gas exhaust port of the cell/stack assembly unit by selecting a thermocouple or sheathed thermocouple and an extension leadwire of the type and class that are appropriate in accordance with IEC 60584-1, IEC 60584-2, IEC 60584-3 or IEC 61515. If it is difficult to measure the gas temperature during the cell performance test, the cathode exhaust gas temperature shall be measured during the preparation of the performance test under the same conditions as those of the performance test.

NOTE There can be significant differences between the temperature of the tube wall and the temperature of the bulk gas.

7.4.8 Cathode exhaust gas pressure

Cathode exhaust gas pressure shall be measured downstream of the cathode gas exhaust port of the cell/stack assembly unit by using a pressure sensor, manometer, Bourdon tube or similar device. The measuring instrument should be located in such a manner that the uncertainty is minimized in consideration of any pressure loss within the piping, piping temperature and other factors.

7.5 Output voltage

A voltage meter shall be connected to the voltage measuring points, as described in Clause 5. The voltage thus measured shall be deemed to be the voltage of the cell/stack. The connecting cable shall be durable enough for the test conditions. Attention shall be paid to the thermoelectromotive force at the connection.

7.6 Output current

A galvanostat or electric load connected to the current lead points, as described in Clause 5, and/or a current sensor, such as a shunt resistor located within the current circuit, shall be used to measure the current by sending its output to a measuring/recording instrument. The connecting cable shall be selected for appropriate materials and geometry in consideration of the test conditions and possible voltage drop within the cable.

7.7 Cell/stack assembly unit temperature

A thermocouple, or sheathed thermocouple, and an extension leadwire of the type and class that are appropriate shall be selected in accordance with IEC 60584-1, IEC 60584-2, IEC 60584-3 or IEC 61515. They shall be placed at the temperature measuring point as described in Clause 5 and connected with a recorder or similar for measurement. When there is more than one temperature measuring point, the unit temperature and its distribution shall be obtained by the calculation method recommended by the manufacturer.

7.8 Mechanical load

A mechanical load applied as recommended by the manufacturer shall be measured.

7.9 Total impedance

The total impedance of the cell/stack assembly unit shall be measured by either the AC impedance method or the current interruption method. An appropriate measuring line shall be used in order to ensure high-quality data over the entire frequency range investigated.

7.10 Ambient condition

In defining the ambient condition, ambient temperature, pressure and relative humidity shall be measured. Sampling interval shall be the value specified in ISO 8756 or less.

8 Test preparation

8.1 General

The type of cell/stack assembly unit to be tested, the number of samples, test parameters, and test conditions shall be determined.

Each measuring instrument shall be checked for its last calibration, the uncertainty under the calibration conditions, or estimated from the class of the instrument, and its dependency on the environmental conditions in order to estimate the uncertainty of the instrument. The method and cycle of calibration and replacement shall be designed to ensure that there is no increase in measurement uncertainty.

The components of the anode and cathode gases and their main impurities shall be verified. As described in Clause 7, a preliminary test shall be performed for gas composition and temperature in order to ensure that the gas compositions are established within the anticipated uncertainty and that the supply gas temperature does not affect the unit temperature. Further, the test procedure, test conditions, and judging criteria for stable state, among others, shall be determined based on the preliminary test results and other factors.

8.2 Standard test condition and test range

The standard test conditions and the typical test range that are recommended by the manufacturer shall be reviewed for the following parameters in order to determine the test conditions and range:

- a) cell/stack assembly unit temperature;
- b) allowable cell/stack assembly unit temperature distribution (if multiple measuring points);
- c) anode gas flow rate;
- d) anode gas composition;
- e) anode gas pressure;
- f) cathode gas flow rate;
- g) cathode gas composition;
- h) cathode gas pressure;
- i) effective fuel utilization;
- j) effective oxygen utilization;
- k) current or current density;
- l) minimum cell/stack assembly unit voltage;
- m) minimum cell/stack assembly unit current (under a constant effective fuel utilization; a minimal operational load, see Annex E for more information);
- n) maximum cell/stack assembly unit current (under a constant effective fuel utilization). Damage due to excessive degradation is possible beyond this value;
- o) mechanical load.

8.3 Components and impurities of anode gas and cathode gas

If gases are used to prepare the anode gas, purity level or components and major impurities of each gas shall be verified by the composition tables published by the respective gas suppliers or through analysis. When the anode gas is produced from liquid fuel, its density, its carbon, hydrogen, and oxygen content, and content of impurities, such as sulphur, shall be verified by the composition table published by the gas supplier or through analysis in accordance with ISO 12185 or ISO 4260.

The purity or components and major impurities of the cathode gas shall be verified by the composition table published by the gas supplier or through analysis. If a compressor is used, the compressed air shall be free of oil and particles in accordance with ISO 8573-1.

The result of each verification or analysis shall be described in the test report.

8.4 Basis of the test procedure

The start-up conditions, such as heating rate and ambient conditions during the heating ramp, the condition of the anode (i.e. the extent of reduction of the nickel oxide to nickel), and the shut-down conditions, such as cooling rate and ambient conditions during the cooling ramp, shall be based on those recommended by the manufacturer or the results of preliminary tests.

8.5 Confirmation of aging condition for unit

The aging condition of the cell/stack assembly unit shall be determined based on the aging condition recommended by the manufacturer, as well as the preliminary tests to be conducted, to ensure that the output drift at the time of measurement is insignificant.

8.6 Confirmation of criteria of stable state

The tolerance level of variation shall be determined for the output current or output voltage of the cell/stack assembly unit, and the judgement criteria for stable state shall be determined through preliminary testing and others.

The judgement criteria for stable state shall be described in the test report.

8.7 Data acquisition method

Preliminary tests shall be conducted while taking into consideration the variation of each test parameter and the sampling rate of each measuring instrument, amongst other things, to determine the sampling interval and the number of samplings and measurements. The sampling interval (e.g. 1 s) shall be short enough to observe the variation of the measured parameter with sufficient time resolution. The number of samplings and repetitions for a single measurement shall be decided so that the total measurement period becomes sufficiently longer than the dominant variation cycle of each test parameter.

9 Test procedure

9.1 Set-up

The test set-up procedure shall be as follows:

- a) Check each control or measurement subsystem for possible leakage. There are many methods for leak-checking, such as pressure hold and helium leak detectors. The choice of method will depend on the equipment in use. The proper operation of the test equipment should be verified by comparing its performance with the parameters specified in 7.2.
- b) Prepare a cell/stack assembly unit consisting of cell(s), gas passage, interconnectors, current collectors, insulation and other components in accordance with the assembly

method and procedure recommended by the manufacturer. Before connecting the cell/stack to the test bench, measure the resistance between cathode and anode current lead points to determine if there is a short-circuit. Measure the resistance between cell voltage measuring points to determine if they are electrically insulated. Measure the cell-to-cell resistances. These values should not indicate a short-circuit, but, rather, should be similar to those specified by the manufacturer.

- c) Set up the cell/stack assembly unit in a temperature control subsystem and install the wiring for voltage measurement and current leads, the mechanical load, and thermocouples as well as the piping for the gas supply and exhaust. Connect the wires to their corresponding subsystems. Ensure proper insulation between thermocouples and the cell/stack. There should also be electrical insulation between the mechanical load and the cell/stack.
- d) Check gas pipe connections for leakage (see 9.1.a).
- e) If needed, verify the wiring for insulation to earth. It is recommended to check the insulation before the output control subsystem or measurement subsystem is connected. In addition, proper wiring shall be verified at joint connections.
- f) When the above are all completed, the measurement subsystem is checked for its proper operation.

9.2 Initial conditioning

The cell/stack assembly unit shall be started up at the temperature increasing rate and ambient condition as specified in 8.4 and operated until it reaches the stable state after going through anode reduction and conditioning.

9.3 Shut-down

The shut-down procedure shall be initiated at the prescribed temperature decreasing rate and ambient condition as specified in 8.4. Unless otherwise provided, temperature shall be decreased under such conditions as the user has determined, based on preliminary tests or as directed by the manufacturer. During this time, the air flow to the air electrode is maintained and hydrogen diluted with nitrogen (or other inert gas) is flowing to the fuel electrode. The concentration of hydrogen in this gas mixture shall be below the lower explosive limit.

10 Performance test

10.1 Rated power test

10.1.1 Objective

The objective of this test is to measure and verify the output of the cell/stack assembly unit under rated conditions.

10.1.2 Test method

All control parameters shall be set at rated conditions, and after the cell/stack assembly unit has reached the stable state, the voltage, current and other control parameters shall be measured repeatedly at a sampling interval until the number of samples and measurements are obtained as prescribed in 8.7. The average value of the measurements shall be the measured value. Optionally, include the standard deviation of the measurements.

10.1.3 Presentation of results

The measurement results shall be used to calculate the rated power output and recorded in the test report with voltage, current and other measurements of the test conditions.

10.2 Current-voltage characteristics test

10.2.1 Objective

The objective of this test is to determine the dependency of current-voltage characteristics on temperature, pressure, gas composition, gas flow rate or effective gas utilization.

10.2.2 Test method

10.2.2.1 Test under constant flow rate

The control parameter on which the dependency is to be measured shall be set at its initial value while the anode gas and cathode gas flow rates as well as other control parameters shall be set at those of the test conditions. The unit shall be operated until the stable state is reached under open-circuit condition, and current-voltage characteristics are measured by changing the current or voltage stepwise, or sweeping it at a constant speed. After the measurement, the control parameter is set to the next value and the measurement shall be repeated within the measuring range specified in 8.2.

- a) When current is step-changed, the cell/stack assembly unit shall be operated until it reaches the stable state in each step (temperature and voltage), and at each step measurements are taken over the duration of time at the sampling intervals as prescribed in 8.7. The average value of these measurements shall be the measured value for that step.
- b) When a current sweep is used, the sweep speed shall be determined such that the maximum width of the voltage hysteresis does not exceed the voltage variation in the stable state.
- c) When voltage control is used, step a) or b) shall be taken with step voltage or voltage sweep, respectively.

NOTE The meaning of the maximum width of the voltage hysteresis is explained in Annex D.

10.2.2.2 Test under constant effective fuel and/or oxygen utilization, or constant stoichiometric ratio

The control parameter on which the dependency is to be measured shall be set at its initial value while effective fuel utilization and/or effective oxygen utilization, and other control parameters shall be set at those of the test operating conditions given in 8.2. The unit shall be operated at the minimum current specified by the manufacturer until it reaches the stable state, and current-voltage characteristics shall be measured by changing the current or voltage stepwise. The unit shall be operated in each step until it reaches the stable state with measurements being taken over the duration of time at the sampling rate as prescribed in 8.7. The average value of these measurements shall be the measured value for that step. After the measurement, the control parameter is set to the next value and the measurement shall be repeated within the measuring range specified in 8.2.

An example of the record of I - V characteristics test under constant effective fuel utilization is given in Annex E.

10.2.3 Presentation of results

The results shall be expressed in a two-dimensional plot with its horizontal axis representing current density or effective fuel utilization, or a combination of current density and fuel utilization, and its vertical axis representing cell/stack assembly unit voltage. This plot shall be included in the test report with the other test conditions. Alternatively to the stack voltage, the measured cell voltages or the average cell voltage may be plotted against current density. Optionally, include the standard deviation of the measurements.

10.3 Effective fuel utilization dependency test

10.3.1 Objective

The objective of this test is to study the dependency of the performance of the cell/stack assembly unit on effective fuel utilization and to confirm the maximum effective fuel utilization under various operating conditions.

10.3.2 Test method

10.3.2.1 General

The maximum fuel utilization as well as the conditions used to obtain this value shall be obtained from the manufacturer or determined through consultation between the manufacturer and the evaluator.

Test shall be conducted either by decreasing the anode gas flow rate at constant current or by increasing current at constant anode gas flow rate.

10.3.2.2 Test at constant current

The following steps shall be carried out:

- a) Set the cell/stack assembly unit at the test conditions as specified in 8.2, operate it and verify that it has reached the stable state.
- b) Decrease the anode gas flow rate stepwise until the cell/stack assembly unit reaches the maximum effective fuel utilization as specified by the manufacturer. For each step, verify that the voltage has reached the stable state and record it.
- c) When the fuel utilization reaches the maximum effective value, return the anode gas flow rate stepwise to the original value and record the voltage. Comparing this voltage to that before this step provides information about whether or not the maximum effective fuel utilization specified by the manufacture as achievable if only for a short period of time can be reached by the cell/stack assembly unit. This is different to that seen in 10.4.

10.3.2.3 Test at constant anode gas flow rate

The following steps shall be carried out:

- a) Set the cell/stack assembly unit at the prescribed test conditions, operate it and verify that it has reached the stable state.
- b) Increase the current stepwise until the cell/stack assembly unit reaches the maximum effective fuel utilization. For each step, verify that the voltage has reached the stable state and record it.
- c) When the fuel utilization reaches the maximum effective value, return the current to the original value stepwise and record the voltage. Comparing this voltage to that before this step provides information about the maximum effective fuel utilization which can be achieved by the cell/stack assembly unit if only for a short period of time. This is different to that seen in 10.4

The criteria for suspending the test should be determined in advance either by preliminary testing or by consulting with the manufacturer in order to prevent any performance degradation or damage to the cell/stack assembly unit.

10.3.3 Presentation of results

The results shall be expressed in a two-dimensional plot with its horizontal axis representing effective fuel utilization, or a combination of anode gas flow rate and effective fuel utilization in the case of 10.3.2.2, and effective fuel utilization, or a combination of current density and effective fuel utilization in the case of 10.3.2.3, and its vertical axis representing cell/stack

assembly unit voltage. This plot shall be included in the test report with the other test conditions.

The stack assembly unit voltage can be replaced by the average cell voltage. Alternatively, the measured cell voltages may be plotted against current density.

10.4 Long term durability test

10.4.1 Objective

The objective of this test is to evaluate the performance degradation of the cell/stack assembly unit when it is exposed to certain test conditions over a long period of time and to examine the effect of temperature, current, gas composition, gas impurities and other factors on the durability of the cell/stack assembly unit.

10.4.2 Test method

10.4.2.1 General

This test shall be conducted by maintaining the test conditions constant for the duration of test, either measuring change in the cell/stack assembly unit voltage at constant current, or measuring change in the unit voltage together with total resistance. The total resistance shall be measured at a certain interval (100 h – 500 h) by the I - V curve in 10.2 or the impedance spectrum in 10.7.

10.4.2.2 Voltage change test

Set up all the controlling parameters at the prescribed test conditions and measure the voltage of the cell/stack assembly unit at regular intervals. The measured values shall be used to obtain the rate of voltage change for the entire test period or the specific time duration.

10.4.2.3 Voltage and total resistance change test

This test may be performed during 10.4.2.2.

The following method shall be used for the measurement of total resistance:

- Measure whole I - V characteristics between 0 to maximum current as specified in 8.2, or measure partial I - V characteristics in the vicinity of the holding current, both in a similar manner to that stated in 10.2.
- Derive the approximate tangent to the I - V curve at holding current by connecting two points on the I - V curve in the vicinity across the holding current and find the slope of the tangent. Report the slope as total resistance.
Selection of the points in the vicinity of the holding current requires care. The points should be closer to the holding current when the curvature of the I - V curve is large. The uncertainty in the voltage and current measurements should be kept as small as possible.
- After measuring the I - V curve, restore the values to those of the original test condition and measure voltage until the next measuring cycle.
- Repeat this measurement at a certain interval throughout the test duration.

The results shall be used to calculate the voltage variation rate and total resistance variation rate for the entire test period or specific time duration within the test period.

It is also possible to measure the total impedance described in 10.7 at the time of total resistance measurement.

10.4.3 Presentation of results

In the case of 10.4.2.2, the results shall be expressed in a two-dimensional plot with the horizontal axis representing time and the vertical axis representing voltage and shall be included in the test report with the voltage change rate and test conditions. In the case of 10.4.2.3, the vertical axis shall represent voltage and total resistance, and the plot shall be included in the test report along with voltage change rate, total resistance variation rate and test conditions.

The stack assembly unit voltage may be replaced with the average cell voltage. Alternatively, the measured cell voltages may be plotted against time.

NOTE These results may also be represented as area-specific resistance (or impedance). Here, the area-specific resistance (impedance) equals the measured resistance (impedance) multiplied by the active electrode area.

10.5 Thermal cycling durability test

10.5.1 Objective

The objective of this test is to evaluate the durability of the cell/stack assembly unit with thermal cycling. The thermal cycles shall be within the manufacturer's specifications.

10.5.2 Test method

10.5.2.1 General

For this test, the following test conditions shall be obtained from the manufacturer or determined through consultation between the manufacturer and the evaluator in advance.

The operating temperature shall be the temperature of the standard test conditions.

- a) number of thermal cycles;
- b) cooling rate;
- c) heating rate;
- d) minimum temperature;
- e) operating conditions at operating temperature;
- f) period to maintain operating temperature;
- g) period to maintain minimum temperature;
- h) total test period;
- i) gas flow rate and composition at heating and cooling conditions, and minimum temperature, respectively.

10.5.2.2 Test procedure

In accordance with the above test conditions, either the method of measuring cell/stack assembly unit voltage variation at the operating temperature or measuring total resistance together with cell/stack assembly unit voltage shall be chosen. When measuring total resistance, follow the method of 10.4.2.3. The voltage shall be measured over the prescribed duration of time. After a certain operating temperature period, the temperature of the cell/stack assembly unit shall be decreased to minimum temperature with the cell/stack assembly unit at open circuit under the prescribed conditions, and the minimum temperature shall be maintained for the prescribed time. The temperature of the cell/stack assembly unit shall then be raised under the prescribed conditions to the operating temperature and the measurement shall resume as before.

These measurements shall be repeated until the prescribed number is reached. The results obtained shall be used to calculate the voltage variation rate and total resistance variation rate over the entire test period or specific time duration within the test period.

10.5.3 Presentation of results

The results shall be expressed in a two-dimensional plot with the horizontal axis representing either (a) time or (b) number of cycles. The test conditions shall be also described in the test report.

If (a), unit voltage, total resistance (optional), and temperature shall be plotted on the vertical axis.

If (b), unit voltage and total resistance (optional) shall be plotted on the vertical axis.

10.6 Internal reforming performance test

10.6.1 Objective

The objective of this test is to evaluate the internal reforming performance of the cell/stack assembly unit under the open-circuit conditions or rated condition against hydrocarbons (HC) such as methane contained in the anode gas.

10.6.2 Test method

10.6.2.1 General

This test shall be performed according to the manufacturer's recommendation or after consultation between the manufacturer and the evaluator regarding the cell/stack's ability to reform HCs internally; some cell/stack assembly units may not be able to do so.

NOTE Many complex reactions may occur with HC-containing anode gases, depending on composition and thermodynamic equilibria. These reactions may affect the temperature gradients in the cell and stack.

This test is applicable when anode gas and anode exhaust gas can be sampled without any mixing with cathode gas or cathode exhaust gas.

10.6.2.2 Test procedure

Anode gas containing HCs shall be supplied to the cell/stack assembly unit. After the unit reaches the stable state in the open circuit or rated condition, the anode gas and anode exhaust gas shall be analysed for their compositions; these are used to calculate the HC conversion rate which indicates the internal reforming characteristic.

The HC conversion rate for a specific HC_j, ξ_j (%) is calculated as follows:

$$\xi_j = 100 (f_{\text{HC},j,\text{in}} - f_{\text{HC},j,\text{out}}) / f_{\text{HC},j,\text{in}} \quad (2)$$

where $f_{\text{HC},j,\text{in}}$ and $f_{\text{HC},j,\text{out}}$ represent the flow rates of the specific HC_j at the anode inlet and outlet, respectively, which are calculated from the anode gas flow rate and its HC concentration, and the anode exhaust gas flow rate and its HC concentration, respectively.

10.6.3 Presentation of results

The compositions and flow rates of anode gas and anode exhaust gas as well as the HC conversion rate shall be described in the test report with the test conditions.

10.7 Resistance components identification test

10.7.1 Objective

The main objective of this test is to identify and evaluate ohmic and non-ohmic components of the total resistance of the cell/stack assembly unit.

10.7.2 Test method

10.7.2.1 General

The separation of resistance components of the cell/stack assembly unit shall be evaluated by either the AC impedance method or the current interruption method.

10.7.2.2 AC electrochemical impedance method

The following test conditions shall be determined in advance by conducting preliminary tests.

a) Measuring range for frequencies:

The highest frequency should roughly identify point A, and the lowest frequency should roughly identify point C when plotted in the complex impedance diagram (see Figure 2).

b) Number of measuring points:

Four to twenty points per one order of frequencies (to be distributed evenly as logarithms, if possible) shall be required; they shall be numerous enough to identify clearly the geometry of impedance plots. If possible, avoid the fundamental and harmonics of the electrical grid frequency.

The test shall be conducted using the following procedure:

a) establish the test conditions;

b) verify that the stable state has been reached;

c) superimpose AC sinusoidal waves on DC current or voltage and start measurements. Sweep the AC sinusoidal waves within the prescribed frequency range and measure the impedance at each frequency.

The amplitude of AC signal for the measurement shall be enough to activate the cell but not overly polarize it. The amplitude per cell may be obtained by dividing the total voltage amplitude with the number of cells in series. As an option, the validity of the impedance spectrum shall be verified by using appropriate validation relations such as the Kramers-Kronig (KK) relationships or Z-hit.

10.7.2.3 Current interruption method

When employing this method, the current interruption characteristics and sampling rate to allow the evaluation of a target property of the cell/stack assembly unit shall be identified by preliminary testing. Measurements shall be taken after ensuring that the unit is in the stable state under the test condition.

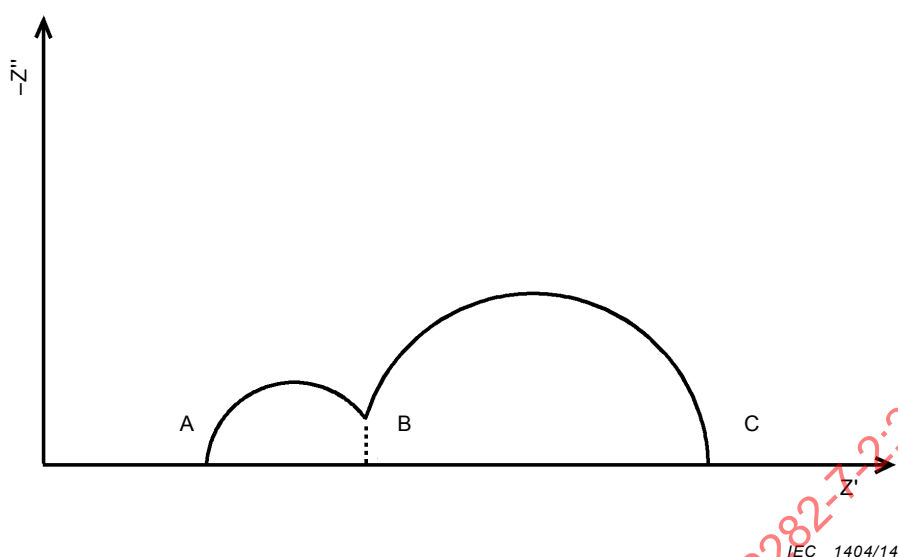
10.7.3 Presentation of results

a) AC impedance method

The test results shall be expressed as a complex impedance or Cole-Cole plot (indicate characteristic frequencies) or Bode plot (a plot of impedance components against the logarithm of measured frequency). The impedance per unit area calculated by active area defined in 3.1.2 shall be plotted.

b) Current interruption method

The current (density) and voltage response waveforms observed before and after current interruption shall be plotted against the time axis. The sampling rate shall be appropriate to identify the ohmic resistance component. The ohmic resistance component so obtained shall be reported with the test conditions.

**Key**

- A high frequency end impedance
- C low frequency end impedance
- A-B high frequency arc impedance
- B-C low frequency arc impedance
- Z' real part of impedance
- Z'' imaginary part of impedance

Figure 2 – Typical diagram of complex impedance plot for SOFC

NOTE These results may also be represented as area-specific resistance (or impedance). Here, the area-specific resistance (impedance) equals the measured resistance (impedance) multiplied by the active electrode area.

11 Test report

11.1 General

Test reports shall accurately, clearly and objectively present sufficient information to demonstrate that all the objectives of the tests have been attained. A suggested template for the test report is given in Annex F.

11.2 Report items

The report shall present the following information, at a minimum:

- a) title of the report;
- b) authors of the report;
- c) date of the report;
- d) test report reference/identification number;
- e) location and (start) date/time of the test;
- f) test bench used;
- g) test unit data (see 11.3 for details);
- h) test conditions (see 11.4 for details);
- i) test data (see 11.5 for details).

11.3 Test unit data description

Test unit data shall include the following information, at a minimum:

- a) product name and brand name of the unit;
- b) active electrode area;
- c) number of cells (total, series, parallel);
- d) cell materials and thicknesses, if known, and cell identification number(s);
- e) stacking materials, if known;
- f) geometry of the unit;
- g) temperature measurement and load application positions.

11.4 Test condition description

The test condition description shall include the following information, at a minimum:

- a) name of person(s) conducting the test;
- b) instruments and, calibration record;
- c) test procedure;
- d) aging condition;
- e) criteria of stable state;
- f) data acquisition method;
- g) gas purity and impurities;
- h) test bench layout.

11.5 Test data description

Test data shall include the following information:

- a) title of the test(s);
- b) test operating conditions;
- c) test result;
- d) ambient conditions;
- e) uncertainty evaluation (see 11.6 for details).

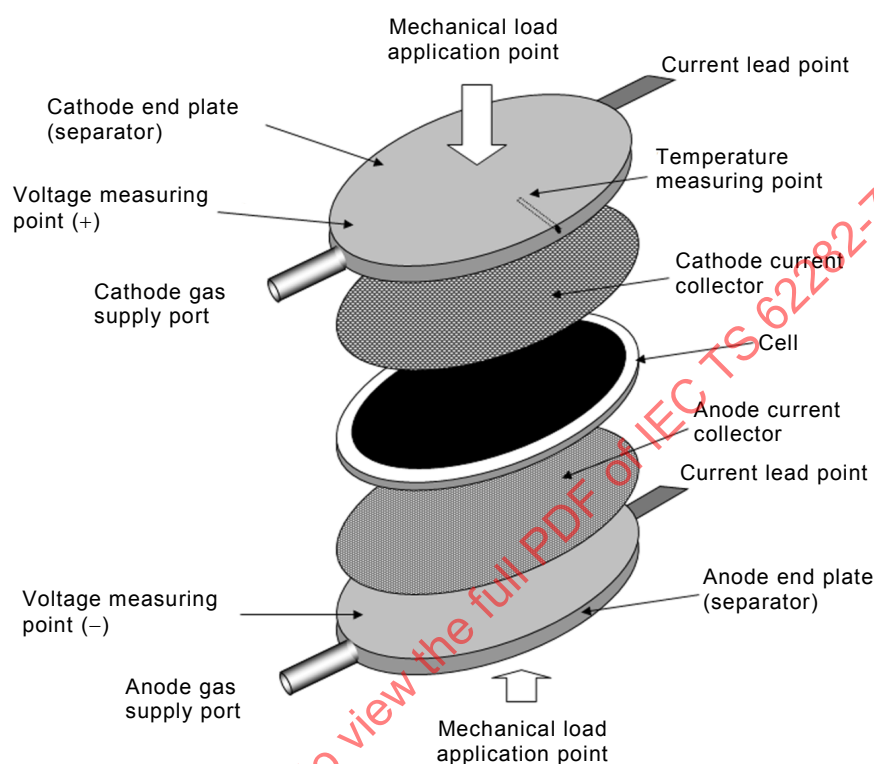
11.6 Uncertainty evaluation

Uncertainties of instruments shall be reported. If necessary, variation of measurements and/or measurement uncertainties calculated from the variation of measurements and uncertainties of instruments should be reported.

Annex A (informative)

Example of cell assembly unit

An example configuration and test boundary of a cell assembly unit described in this technical specification are shown in Figure A.1.



IEC 1405/14

Figure A.1 – Example of cell assembly unit

In this schematic example, the cathode current collector and anode current collector also work as cathode gas flow channel and anode gas flow channel, respectively. The exhaust gas comes out from the respective circumference of each current collector.

NOTE It is possible to measure the voltage at the current collector to exclude the voltage drop due to contact resistances (plate-current collector).

Annex B (informative)

Calculation of effective fuel utilization

This annex instructs how to calculate effective fuel utilization as defined in 3.1.11.

B.1 Calculation method

In a performance test, an anode gas is supplied at a rate of f_a (l/min (NTP)). Flow-rate of each fuel component in the anode gas is expressed as f_j (l/min (NTP)) ($j = \text{H}_2, \text{CO}, \text{CH}_4, \dots, \text{C}_p\text{H}_q\text{O}_r$) where $\text{C}_p\text{H}_q\text{O}_r$ is the chemical formula of a general fuel. In the case that the anode gas composition is analysed, f_j shall be calculated from the mole fraction of each fuel component (x_j (mol %)) and f_a using Equation (B.1):

$$f_j = \frac{x_j}{100} \times f_a \quad (\text{B.1})$$

In the example that follows, it is assumed that N cells are connected in series and that the fuel is uniformly distributed between the cells. A theoretical current defined in 3.1.10, I_{theory} (A), assuming that the supplied fuel gas is completely consumed in electrochemical reactions, shall be calculated from Equation (B.2):

$$\begin{aligned} I_{\text{theory}} &= \frac{P_{\text{st}}}{R \times T_{\text{st}} \times 60 \times 1000} \times F \times \left(\frac{\sum_j n_j \times f_j}{N} \right) \\ &= \frac{101\,325 \times 96\,485}{8,314\,51 \times 273,15 \times 60 \times 1\,000} \times \left(\frac{\sum_j n_j \times f_j}{N} \right) = 71,74 \times \left(\frac{\sum_j n_j \times f_j}{N} \right) \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

where

P_{st} is the standard pressure (101 325 Nm⁻²);

T_{st} is the standard temperature (273,15 K);

R is the gas constant (8,314 4 Jmol⁻¹K⁻¹);

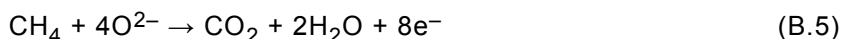
F is Faraday's constant (96 485 C/mol);

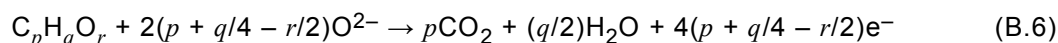
n_j is the number of electrons transferred when one molecule of fuel component;

j is electrochemically reacted;

N is the number of cells in series.

The electron transferred, n_j for representative fuels is determined by Equations (B.3) to (B.6) and is summarized in Table B.1. For the general $\text{C}_p\text{H}_q\text{O}_r$ component, n_j is equal to $4(p + q/4 - r/2)$:





The measured current output of each cell or that from the total cell/stack assembly is expressed as I_{measured} . Therefore, effective fuel utilization, or U_f (%) can be calculated from Equation (B.7):

$$U_f = \frac{I_{\text{measured}}}{I_{\text{theory}}} \times 100 \% \quad (B.7)$$

Table B.1 – n_j for representative fuels

Fuel	n_j
H ₂	2
CO	2
CH ₄	8
C _p H _q O _r	4(p + q/4 - r/2)

B.2 Calculation examples

B.2.1 Calculation from anode gas composition and flow-rate

Normalized anode gas mole fraction, x_i is assumed to be as in Table B.2 as a result of anode gas composition analysis. It is presumed that anode gas flow rate, f_a , is 0,500 l/min (NTP). The flow rates, f_j , of H₂, CO and CH₄, which are fuel components in the anode gas, are calculated using Equation (B.1) as 0,281, 0,047, 0,003 l/min (NTP), respectively. Then, $\sum_j n_j f_j$ is calculated by summing up each $n_j \times f_j$, leading to $\sum_j n_j f_j = 0,562 + 0,094 + 0,024 = 0,680$ l/min (NTP). Hence, if $N = 10$ cells, $I_{\text{theory}} = 71,74 \times 0,680/10 = 4,88$ A is obtained using Equation (B.2). If it is assumed that the actual output current of the stack is 3,90 A, I_{measured} is equal to 3,90 A. Therefore, effective fuel utilization can be calculated using Equation (B.7) as $U_f = \frac{3,90}{4,88} \times 100 = 80 \%$.

Table B.2 – Anode gas composition, flow rate of each fuel component f_j , and $n_j f_j$

Component	x_i / mol %	f_j / l/min (NTP)	$n_j f_j$ / l/min (NTP)
H ₂	56,1	56,1/100 × 0,500 = 0,281	2 × 0,281 = 0,562
H ₂ O	27,1		
CO	9,3	9,3/100 × 0,500 = 0,047	2 × 0,047 = 0,094
CO ₂	7,1		
CH ₄	0,5	0,5/100 × 0,500 = 0,003	8 × 0,003 = 0,024

B.2.2 Calculation from supplied H2 and H2O flow rate

It is assumed that H₂ and H₂O are supplied to anode by controlling each flow rates. It is also assumed that in a performance test of a 40-cell-stack in which the number of series connection is 10 with 4 parallel connections, H₂ flow-rate, f_j , and output current are to be equal to 3,00 l/min (NTP) and 32,3 A, respectively. Using Equation (B.2), I_{theory} is calculated as $71,74 \times (2 \times 3,00) / 10 = 43,0$ A. Therefore, with $I_{\text{measured}} = 32,3$ A, effective fuel utilization can be calculated as $U_f = \frac{32,3}{43,0} \times 100 = 75,1\%$ from Equation (B.7).

NOTE The number of parallel connections does not make any difference to the calculation.

Annex C (informative)

Calculation of effective oxygen utilization

This annex instructs how to calculate effective oxygen utilization as defined in 3.1.12.

C.1 Calculation method

In a performance test, a cathode gas is supplied at a rate of f_c (l/min (NTP)). Oxygen flow-rate (f_{O_2} (l/min (NTP))) shall be calculated from oxygen molar fraction in the cathode gas, or x_{O_2} (mol %), using Equation (C.1):

$$f_{O_2} = \frac{x_{O_2}}{100} \times f_c \quad (C.1)$$

The theoretical current defined in 3.1.10, I_{theory} (A), assuming that the cathode gas is uniformly distributed among N cells connected in series in the stack and that the cathode gas is completely consumed in electrochemical reactions, shall be calculated from Equation (C.2):

$$I_{\text{theory}} = \frac{P_{\text{st}}}{R \times T_{\text{st}} \times 60 \times 1\,000} \times F \times \frac{n_{O_2} \times f_{O_2}}{N} \quad (C.2)$$

$$= \frac{101\,325}{8,314\,51 \times 273,15 \times 60 \times 1\,000} \times 96\,485 \times \frac{n_{O_2} \times f_{O_2}}{N} = 287,0 \times \frac{f_{O_2}}{N}$$

where

P_{st} is the standard pressure (101 325 Nm⁻²);

T_{st} is the standard temperature (273,15 K);

R is the gas constant (8,314 4 Jmol⁻¹K⁻¹);

F is Faraday's constant (96 485 C/mol);

n_{O_2} is the number of electrons transferred when one molecule of oxygen is electrochemically reduced, leading to $n_{O_2} = 4$ as shown in Equation (C.3), and

N is the number of cells connected in series:



The measured current output of each cell or that from the total cell/stack assembly is expressed as I_{measured} . Therefore, effective oxygen utilization, or U_{O_2} (%) shall be calculated from Equation (C.4):

$$U_{O_2} = \frac{I_{\text{measured}}}{I_{\text{theory}}} \times 100 \% \quad (C.4)$$

C.2 Calculation example

In a performance test, it is assumed that the cathode gas flow-rate, f_c , is 1,50 l/min (NTP), there are $N = 10$ cells connected in series in the stack with the gas composition as in Table C.1. $f_{O_2} = 0,314$ l/min (NTP) and $I_{\text{theory}} = 9,01$ A can be obtained using Equations (C.1) and (C.2), respectively. When the actual output current at the stack performance test is

2,70 A, I_{measured} is equal to 2,70 A. Therefore, effective oxygen utilization can be calculated as $U_{\text{O}_2} = 2,70/9,01 \times 100 = 30 \%$ using Equation (C.4).

Table C.1 – Cathode gas composition, f_{O_2} , and I_{theory}

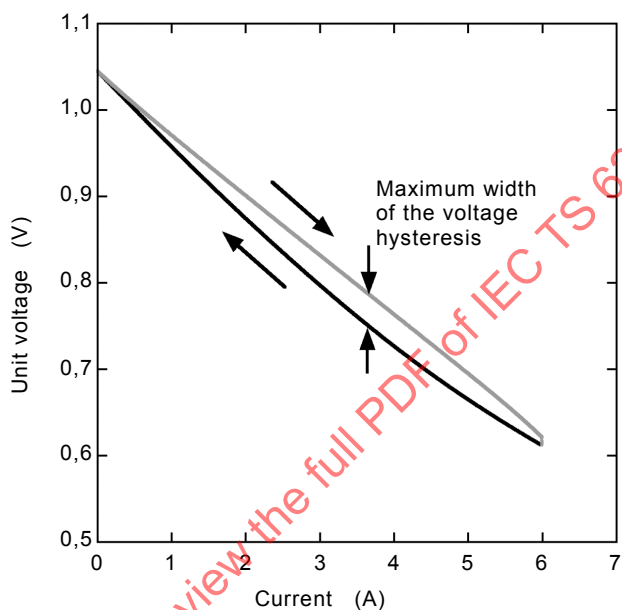
Component	x_i / mol %	f_{O_2} / l/min (NTP)	I_{theory} / A
O ₂	20,95	$20,95/100 \times 1,50 = 0,314$	$287,0 \times 0,314/10 = 9,01$
N ₂	79,05		

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 62282-7-2:2014

Annex D (informative)

Maximum width of the voltage hysteresis in I - V characteristic test

When I - V characteristics are taken with the current sweep method described in 10.2.2.1 b), measured voltages may be different with different sweep rate due to hysteresis as shown in the example in Figure D.1. The appropriate sweep rate shall be determined in such a way that the maximum width of the voltage hysteresis is smaller than the allowable maximum variation of voltage that is defined in 6.2.



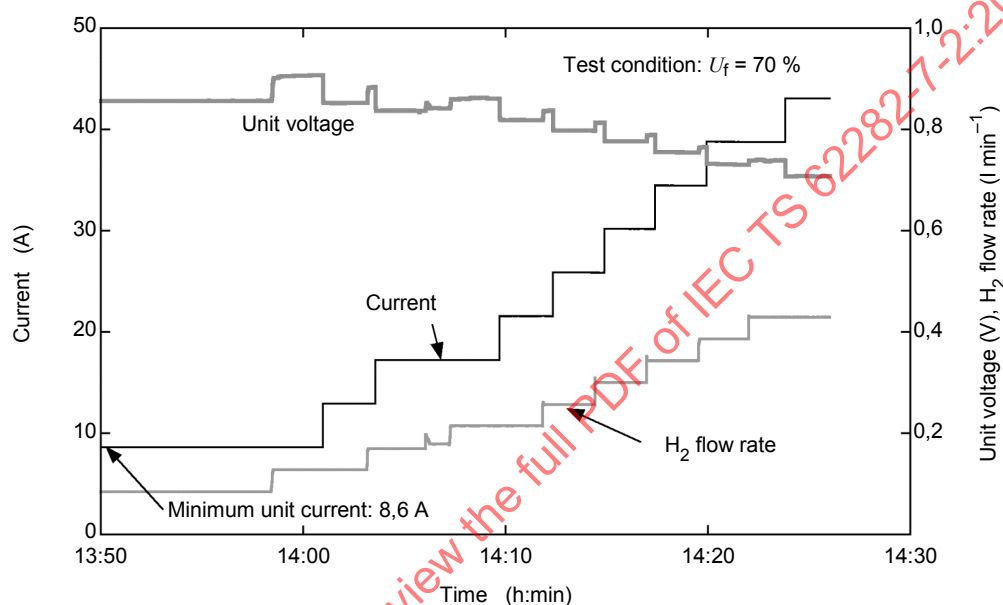
IEC 1406/14

Figure D.1 – Voltage hysteresis at a given sweep rate in I - V characteristic test

Annex E (informative)

Current-voltage characteristic test under constant effective fuel utilization

In order to keep the effective fuel and/or oxygen utilization constant in the measurement range, fuel and/or oxygen flow rates are changed as the current changes. Dependency of unit voltage on current accordingly differs from those observed under a constant gas flow rate. An example of such changes among the unit voltage, current and hydrogen flow rate is shown in Figure E.1.



IEC 1407/14

**Figure E.1 – Example of the record in current-voltage
characteristic test under constant effective fuel utilization**

When I - V characteristics are taken under a constant effective fuel utilization, the unit shall initially be kept at minimum cell/stack assembly unit current as defined in 8.2 m).

Under low current values, voltage becomes unstable due to low gas flow rate. Therefore, the minimum cell/stack assembly unit current should be determined so as to avoid such unstable voltage.

Annex F (informative)

Test report (template)

Examples for a report for general information, test unit data description and test conditions as well as a test report for each test prescribed in the body text are given below. Instructions to the author are given in *italics* and should not be included in the test report. Method for finding "instrument uncertainty" shown in Clauses F.4, F.5, F.6, F.7 and F.8 is given in Annex G.

F.1 General information

Test report title	
Authors of report	
Date of report	
Test report reference/identification number	
Location of test	
Start date/time of test	
Test bench	

F.2 Test unit data description

Product name and brand name of the unit	
Active electrode area	
Number of cells (total, series, parallel)	
Unit identification number	
Geometry of the unit	
Materials and thickness of electrolyte and electrodes	<i>If known</i>

If the following are not available from the manufacturer, they shall be reported.

Configuration of assembly unit and assembling method	
Materials and geometry of the peripheral components	
Flow patterns and directions of anode and cathode gases	
Temperature measurement positions	
Mechanical load (unit) and its application positions	
Voltage measurement positions	
Current lead positions	
Minimum cell voltage (unit)	

F.3 Test condition

Name of person(s) conducting the test	
Instruments and calibration record	
Test procedure	
Aging condition	
Criteria of stable state	
Data acquisition method	
Gas purity and impurities	
Mechanical load	

F.4 Rated power test

Operating conditions

Input	Value (unit)	Instrument uncertainty (unit)	Variation of measurement (Standard deviation) (unit)
f_a			
f_c			
p_a			
p_c			
T_{op}			

Test results

Output	Value (unit)	Instrument uncertainty (unit)	Variation of measurement (Standard deviation) (unit)
OCV			
V			
I			
P			

The data average method has to be described.

F.5 Current-voltage characteristics test

Operating conditions

Input	Value (unit)
f_a (or its range in case of 10.2.2.2)	
f_c (or its range in case of 10.2.2.2)	
p_a	
p_c	
T_{op}	
U_f (in case of 10.2.2.2)	
U_{02} (in case of 10.2.2.2)	

Test results

Output	Value (unit)	Instrument uncertainty (unit)	Variation of measurement (Standard deviation) (unit)
OCV			

I-V curve shall be presented (see 10.2.3).

F.6 Effective fuel utilization dependency test

Initial operating conditions

Input	Value (unit)
f_a	
f_c	
p_a	
p_c	
T_{op}	
I	

Preliminary information

Expected maximum fuel utilization	/ %
-----------------------------------	-----

Test results

Output	Value (unit)	Instrument uncertainty (unit)	Variation of measurement (Standard deviation) (unit)
OCV			

In the case of 10.3.2.2

Step #	f_a (unit)	V (unit)	U_f / %
0			
1			
2			
3			
m			

$U_f(f_a)$ -V curve shall be presented which can replace the above table (see 10.3.3).

In the case of 10.3.2.3

Step #	I (unit)	V (unit)	$U_f / \%$
0			
1			
2			
3			
m			

$U_f(I)$ - V curve shall be presented which can replace the above table (see 10.3.3).

F.7 Long-term durability test

Operating conditions

Input	Value (unit)
f_a	
U_f	
f_c	
U_{O_2}	
p_a	
p_c	
T_{op}	
I	

Test results

Output	Value (unit)	Instrument uncertainty (unit)	Variation of measurement (Standard deviation) (unit)
OCV (start)			
OCV (end)			
t (end)			

The other test results should be presented by two-dimensional plot (see 10.4.3).

F.8 Thermal cycling durability test

Test conditions

Cooling rate	
Heating rate	
Minimum temperature	
Period to maintain operating temperature	
Period to maintain minimum temperature	
Gas composition during heating	
Gas flow rate during heating	
Gas composition during cooling	
Gas flow rate during cooling	
Gas composition at minimum temperature	
Gas flow rate at minimum temperature	

Operating conditions

Input	Value (unit)
f_a	
f_c	
p_a	
p_c	
T_{op}	
I	

Test results

Output	Value (unit)	Instrument uncertainty (unit)	Variation of measurement (standard deviation) (unit)
OCV (start)			
OCV (end)			

The other results should be presented as prescribed in 10.5.3.

F.9 Internal reforming performance test

Operating conditions

Input	Value (unit)
f_a	
f_c	
U_f	
p_a	
p_c	
T_{op}	
I	

Test results

Output	Value (unit)
OCV	
Composition of anode exhaust gas	
Flow rate of anode exhaust gas	
HC conversion rate	/ %

F.10 Resistance components identification test

Operating conditions

Input	Value (unit)
f_a	
f_c	
p_a	
p_c	
T_{op}	
I or V	
Frequency range	
Operating mode (galvanostatic or potentiostatic)	
Amplitude	

Test results

Output	Value (unit)
Total resistance	
Ohmic resistance	

Depending upon the method, corresponding figures shall be attached (see 10.7.3).

Annex G (informative)

Method for finding instrument uncertainty

Instrument uncertainty, U_I , can be obtained by the calibrations using traceable standard instruments. See ISO/IEC Guide 98-3 for further information.

It may also be obtained from the error limit ($\pm a$) of instrument as shown below assuming uniform distribution of the probability within the error limit range:

$$U_I = 2u_I = 2 \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (\text{G.1})$$

where u_I is standard instrument uncertainty.

Some of the measurements are made using several instruments (e.g. for current measurement, the combination of current sensor and digital voltage recorder may be used). The standard uncertainty for such a case can be obtained as shown below assuming no correlation between the instruments:

$$u_I^2 = \sum u_{I,i}^2 \quad (\text{G.2})$$

where $u_{I,i}$ represents standard instrument uncertainty for the i th instrument. Therefore,

$$U_I = 2u_I = 2 \left(\sum u_{I,i}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{G.3})$$

Bibliography

IEC 60352 (all parts), *Solderless connections*

IEC 60359, *Electrical and electronic measurement equipment – Expression of performance*

IEC 60512-1-1, *Connectors for electronic equipment – Tests and measurements – Part 1-1: General examination – Test 1a: Visual examination*

IEC 60512-8-1, *Connectors for electronic equipment – Tests and measurements – Part 8-1: Static load tests (fixed connectors) – Test 8a: Static load, transverse*

IEC 60512-8-2, *Connectors for electronic equipment – Tests and measurements – Part 8-2: Static load tests (fixed connectors) – Test 8b: Static load, axial*

IEC 62282-2, *Fuel cell technologies – Part 2: Modules*

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

ISO 2602, *Statistical interpretation of test results – Estimation of the mean – Confidence interval*

ISO 2854, *Statistical interpretation of data – Techniques of estimation and tests relating to means and variances*

ISO 4677-1, *Atmospheres for conditioning and testing – Determination of relative humidity – Part 1: Aspirated psychrometer method*

ISO 4677-2, *Atmospheres for conditioning and testing – Determination of relative humidity – Part 2: Whirling psychrometer method*

ISO/TR 7066-1:1997, *Assessment of uncertainty in the calibration and use of flow measurement devices – Part 1: Linear calibration relationships*
(withdrawn)

ISO 14687 (all parts), *Hydrogen fuel – Product specification*

Fuel Cells Testing, Safety & Quality Assurance (FCTESQA), Polarisation curve for a SOFC single cell test, Test Module TM SOFC M01 (30 April 2010)

TSOTRIDIS, G., PODIAS, A., WINKLER, W. and SCAGLIOTTI, M., eds., *The Fuel Cells Testing & Standardisation Network, Fuel Cells Glossary, EUR22295 EN (June 2006)*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	49
INTRODUCTION	51
1 Domaine d'application	52
2 Références normatives	52
3 Termes, définitions et symboles	53
3.1 Termes et définitions	53
3.2 Symboles	55
4 Conditions générales de sécurité	56
5 Entité d'assemblage de cellules/piles	56
6 Système d'essai	57
6.1 Sous-systèmes du système d'essai	57
6.1.1 Généralités	57
6.1.2 Sous-système de contrôle du gaz d'anode	58
6.1.3 Sous-système de contrôle du gaz de cathode	58
6.1.4 Sous-système de régulation de la température de l'entité d'assemblage de cellules/piles	58
6.1.5 Sous-système de régulation de puissance de sortie	58
6.1.6 Sous-système de mesure et d'acquisition de données	59
6.1.7 Sous-système de sécurité	59
6.1.8 Sous-système de contrôle de la charge mécanique	59
6.1.9 Sous-système de contrôle de la pression des gaz d'anode et de cathode	59
6.1.10 Sous-système de commande du système d'essai	59
6.2 Variation maximale des éléments de commande du système d'essai	59
7 Instruments et méthodes de mesure	60
7.1 Généralités	60
7.2 Incertitude des instruments	60
7.3 Gaz d'anode	60
7.3.1 Débit du gaz d'anode	60
7.3.2 Composition du gaz d'anode	60
7.3.3 Température du gaz d'anode	61
7.3.4 Pression du gaz d'anode	62
7.3.5 Débit du gaz d'anode d'échappement	62
7.3.6 Composant du gaz d'anode d'échappement	62
7.3.7 Température du gaz d'anode d'échappement	62
7.3.8 Pression du gaz d'anode d'échappement	63
7.4 Gaz de cathode	63
7.4.1 Débit du gaz de cathode	63
7.4.2 Composant du gaz de cathode	63
7.4.3 Température du gaz de cathode	63
7.4.4 Pression du gaz de cathode	63
7.4.5 Débit du gaz de cathode d'échappement	64
7.4.6 Composant du gaz de cathode d'échappement	64
7.4.7 Température du gaz de cathode d'échappement	64
7.4.8 Pression du gaz de cathode d'échappement	64
7.5 Tension de sortie	64

7.6	Courant de sortie	64
7.7	Température de l'entité d'assemblage de cellules/piles	64
7.8	Charge mécanique	65
7.9	Impédance totale	65
7.10	Conditions ambiantes	65
8	Préparation aux essais	65
8.1	Généralités	65
8.2	Conditions et gamme normales d'essai	65
8.3	Composants et impuretés des gaz d'anode et de cathode	66
8.4	Conditions fondamentales de la procédure d'essai	66
8.5	Confirmation du vieillissement de l'entité	66
8.6	Confirmation des critères d'état stable	66
8.7	Méthode d'acquisition de données	66
9	Procédure d'essai	67
9.1	Installation	67
9.2	Conditionnement initial	67
9.3	Arrêt	67
10	Essai de performance	68
10.1	Essai de puissance assignée	68
10.1.1	Objectif	68
10.1.2	Méthode d'essai	68
10.1.3	Présentation des résultats	68
10.2	Essai des caractéristiques courant-tension	68
10.2.1	Objectif	68
10.2.2	Méthode d'essai	68
10.2.3	Présentation des résultats	69
10.3	Essai de dépendance à l'utilisation de combustible efficace	69
10.3.1	Objectif	69
10.3.2	Méthode d'essai	69
10.3.3	Présentation des résultats	70
10.4	Essai de durabilité de longue durée	70
10.4.1	Objectif	70
10.4.2	Méthode d'essai	70
10.4.3	Présentation des résultats	71
10.5	Essai de durabilité à cycle thermique	71
10.5.1	Objectif	71
10.5.2	Méthode d'essai	72
10.5.3	Présentation des résultats	72
10.6	Essai d'aptitude à la fonction de reformage interne	72
10.6.1	Objectif	72
10.6.2	Méthode d'essai	73
10.6.3	Présentation des résultats	73
10.7	Essai d'identification des composants de résistance	73
10.7.1	Objectif	73
10.7.2	Méthode d'essai	73
10.7.3	Présentation des résultats	74
11	Rapport d'essai	75
11.1	Généralités	75

11.2	Eléments contenus dans le rapport	75
11.3	Description des données relatives à l'entité d'essai	76
11.4	Description des conditions d'essai	76
11.5	Description des données d'essai	76
11.6	Évaluation de l'incertitude	76
Annexe A (informative) Exemple d'entité d'assemblage de cellules		77
Annexe B (informative) Calcul de l'utilisation de combustible efficace		78
B.1	Méthode de calcul	78
B.2	Exemples de calculs	79
B.2.1	Calcul à partir de la composition et du débit du gaz d'anode	79
B.2.2	Calcul à partir du débit des gaz H ₂ et H ₂ O fournis	80
Annexe C (informative) Calcul de l'utilisation d'oxygène efficace		81
C.1	Méthode de calcul	81
C.2	Exemple de calcul	81
Annexe D (informative) Largeur maximale de l'hystérésis de tension dans l'essai de caractéristiques I - V		83
Annexe E (informative) Essai de caractéristiques courant-tension avec une utilisation de combustible efficace constante		84
Annexe F (informative) Rapport d'essai (modèle)		85
F.1	Informations d'ordre général	85
F.2	Description des données relatives à l'entité d'essai	85
F.3	Conditions d'essai	86
F.4	Essai de puissance assignée	86
F.5	Essai des caractéristiques courant-tension	86
F.6	Essai de dépendance à l'utilisation de combustible efficace	87
F.7	Essai de durabilité de longue durée	88
F.8	Essai de durabilité à cycle thermique	89
F.9	Essai d'aptitude à la fonction de reformage interne	89
F.10	Essai d'identification des composants de résistance	90
Annexe G (informative) Méthode de détermination de l'incertitude des instruments		91
Bibliographie		92
Figure 1 – Système d'essai		58
Figure 2 – Diagramme type de la courbe d'impédance complexe pour une pile à combustible à oxyde solide (SOFC)		75
Figure A.1 – Exemple d'entité d'assemblage de cellules		77
Figure D.1 – Hystérésis de tension à une fréquence de balayage donnée dans l'essai de caractéristiques I - V		83
Figure E.1 – Exemple d'enregistrement dans le cadre de l'essai de caractéristiques courant-tension avec une utilisation de combustible efficace constante		84
Tableau 1 – Symboles		55
Tableau B.1 – n_j pour les combustibles représentatifs		79
Tableau B.2 – Composition du gaz d'anode, débit de chaque composant de combustible f_j , et $n_j f_j$		79
Tableau C.1 – Composition du gaz de cathode, f_{O_2} , et $I_{théorie}$		82

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TECHNOLOGIES DES PILES À COMBUSTIBLE –

**Partie 7-2: Méthodes d'essai –
Essais de performance de cellule élémentaire et de pile
pour les piles à combustible à oxyde solide (SOFC)**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC 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, l'IEC – 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 l'IEC"). 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 l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC 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 l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC 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 l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC 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 l'IEC. L'IEC 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 l'IEC, 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 l'IEC, 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 l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, 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 l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC 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 tâche principale des comités d'études de l'IEC est l'élaboration des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'une spécification technique

- lorsqu'en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale, ou
- lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou quand, pour une raison quelconque, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat.

Les spécifications techniques font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales.

L'IEC TS 62282-7-2, qui est une spécification technique, a été établie par le comité d'études 105 de l'IEC: Technologies des piles à combustible.

Le texte de cette spécification technique est issu des documents suivants:

Projet d'enquête	Rapport de vote
105/443/DTS	105/498/RVC

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

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

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

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 l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- transformée en Norme internationale,
- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 62282-7-2:2014

INTRODUCTION

La présente spécification technique décrit les méthodes d'essai pour une cellule élémentaire et une pile (désignées ci-après "cellule/pile") à appliquer dans les systèmes de production de puissance qui utilisent des piles à combustible à oxyde solide (SOFC: *en anglais:solid oxide fuel cells*).

La géométrie et la taille des SOFC sont très diverses. De ce fait, en général, les périphériques tels que les collecteurs de courant et les collecteurs de gaz sont uniques à chaque cellule ou à chaque pile et sont souvent incorporés à une cellule ou à une pile afin de constituer une entité intégrée. De plus, ils ont tendance à avoir un impact significatif sur les caractéristiques de production de puissance de la cellule ou de la pile. La présente spécification technique introduit par conséquent comme sujet d'étude des "entités d'assemblage de cellules/piles," définies comme des entités contenant non seulement une cellule ou une pile, mais également des périphériques.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 62282-7-2:2014

TECHNOLOGIES DES PILES À COMBUSTIBLE –

Partie 7-2: Méthodes d'essai – Essais de performance de cellule élémentaire et de pile pour les piles à combustible à oxyde solide (SOFC)

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62282, qui est une spécification technique, fournit des entités d'assemblage de cellules/piles SOFC, des systèmes d'essai, des instruments et des méthodes de mesure, ainsi que des méthodes d'essai afin de vérifier les performances des cellules et des piles SOFC.

La présente spécification technique n'est pas applicable aux petites piles boutons qui sont conçues pour les essais de matériaux SOFC et ne prévoient aucun moyen pratique de mesure de l'utilisation de combustible.

La présente spécification technique est à utiliser pour les échanges de données dans les transactions commerciales entre les fabricants de cellules/piles et les développeurs de systèmes, ou pour l'acquisition de données sur une cellule ou une pile afin d'estimer les performances d'un système sur la base de ces données. Dans ce but, les utilisateurs de la présente spécification technique peuvent choisir d'exécuter des éléments d'essai parmi ceux qui sont décrits ici.

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).

IEC 60584-1, *Couples thermoélectriques – Partie 1: Spécifications et tolérances en matière de FEM*

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

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

IEC 61515, *Câbles et couples thermoélectriques à isolation minérale dits «chemisés»*

IEC TS 62282-1:2013, *Technologies des piles à combustible – Partie 1: Terminologie*

ISO 4260, *Produits pétroliers et hydrocarbures – Dosage du soufre – Méthode de combustion Wickbold*

ISO 5168, *Measurement of fluid flow – Procedures for the evaluation of uncertainties*
(disponible en anglais seulement)

ISO 6141, *Analyse des gaz – Prescriptions relatives aux certificats de gaz et mélanges de gaz pour étalonnage*

ISO 6142, *Analyse des gaz – Préparation des mélanges de gaz pour étalonnage – Méthode gravimétrique*

ISO 6143, *Analyse des gaz – Méthodes comparatives pour la détermination et la vérification de la composition des mélanges de gaz pour étalonnage*

ISO 6145-7, *Analyse des gaz – Préparation des mélanges de gaz pour étalonnage à l'aide de méthodes volumétriques dynamiques – Partie 7: Régulateurs thermiques de débit massique*

ISO 6974 (toutes les parties), *Gaz naturel – Détermination de la composition avec une incertitude définie par chromatographie en phase gazeuse*

ISO 7066-2, *Évaluation de l'incertitude dans l'étalonnage et l'utilisation des appareils de mesure du débit – Partie 2: Relations d'étalonnage non linéaires*

ISO 8573-1, *Air comprimé – Partie 1: Polluants et classes de pureté*

ISO 8756, *Qualité de l'air – Traitement des données de température, de pression et d'humidité*

ISO 12185, *Pétroles bruts et produits pétroliers – Détermination de la masse volumique – Méthode du tube en U oscillant*

3 Termes, définitions et symboles

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'IEC TS 62282-1, ainsi que les termes et définitions suivants, s'appliquent.

3.1.1

entité d'assemblage de cellules/piles

entité comprenant une cellule simple ou une pile, ainsi que des éléments d'alimentation en gaz, des éléments de collecteur de courant et d'autres périphériques éventuels nécessaires pour les essais de production de puissance

3.1.2

surface d'électrode active

surface d'électrode géométrique sur laquelle se produit une réaction électrochimique

Note 1 à l'article: Il s'agit habituellement de la surface la plus petite des surfaces d'anode et de cathode.

3.1.3

densité de courant

courant divisé par la surface d'électrode active

3.1.4

tension de pile moyenne

tension d'entité d'assemblage de cellules/piles divisée par le nombre de piles dans une connexion série de l'entité

3.1.5

température et pression normales

NTP

0 °C et 101,325 kPa, respectivement

Note 1 à l'article: L'abréviation "NTP" est dérivée du terme anglais développé correspondant "normal temperature and pressure".

3.1.6

gaz d'anode

gaz fourni à l'admission de l'anode d'une entité d'assemblage de cellules simples/piles

Note 1 à l'article: Ce type de gaz appartient à l'une des catégories suivantes:

- hydrogène pur ou mélange qui contient de l'hydrogène comme composant principal avec de la vapeur d'eau ou de l'azote;
- gaz reformé de combustible brut de SOFC tel que du méthane ou du kérosène prémélangé avec de la vapeur d'eau ou de l'air comme oxydant;
- gaz simulé de gaz reformé qui contient de l'hydrogène, de la vapeur d'eau, du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone, du méthane, de l'azote, etc., comme composants principaux;
- méthane, alcools et autres combustibles bruts fournis directement sous forme pure ou mélangés avec de la vapeur d'eau et/ou de l'air.

3.1.7

gaz de cathode

gaz fourni à l'admission de la cathode d'une entité d'assemblage de cellules simples/piles

Note 1 à l'article: L'oxygène et l'azote sont ses principaux composants.

3.1.8

collecteur de courant

matériau conducteur dans une cellule élémentaire à combustible qui collecte les électrons du côté anode ou conduit les électrons vers le côté cathode.

3.1.9

état stable

état d'une entité d'assemblage de cellules/piles auquel l'entité est suffisamment stable pour que tout paramètre de régulation et la tension ou le courant de sortie de l'entité restent dans les limites de tolérance de leur plage de variation

3.1.10

courant théorique

courant existant lorsque le gaz d'anode ou de cathode fourni est entièrement consommé dans des réactions électrochimiques, divisé par le nombre de piles dans une connexion série

3.1.11

utilisation de combustible efficace

rapport du courant de sortie réel de l'entité d'assemblage de cellules/piles et du courant théorique

Note 1 à l'article: Les causes de génération de courants inférieurs aux courants optimum incluent les pertes dues à une conduction électronique au sein de l'assemblage de cellules/piles, aux fuites de gaz et à la traversée du gaz d'anode.

Note 2 à l'article: La méthode de calcul de l'utilisation de combustible efficace est donnée à l'Annexe B.

3.1.12

utilisation d'oxygène efficace

rapport du courant de sortie réel de l'entité d'assemblage de cellules/piles et du courant théorique

Note 1 à l'article: La méthode de calcul de l'utilisation d'oxygène efficace est donnée à l'Annexe C.

3.1.13

utilisation de combustible efficace maximale

utilisation de combustible efficace la plus élevée avec laquelle l'entité peut fonctionner sans provoquer de dégradation inacceptable

Note 1 à l'article: Le taux de dégradation acceptable est généralement obtenu auprès du développeur.

3.1.14**tension minimale d'entité d'assemblage de cellules/piles**

tension d'entité d'assemblage de cellules/piles la plus basse spécifiée par le fabricant

3.1.15**tension en circuit ouvert**

OCV

tension aux bornes d'une cellule élémentaire à combustible en présence de gaz de cathode et d'anode et en l'absence de courant extérieur

Note 1 à l'article: Également connue sous le nom «tension à vide».

Note 2 à l'article: L'abréviation "OCV" est dérivée du terme anglais développé correspondant "open circuit voltage".

3.1.16**densité de puissance**

rapport de la puissance et de la surface d'électrode active d'une entité d'assemblage de cellules/piles

Note 1 à l'article: La densité de puissance est calculée à partir de la tension multipliée par la densité de courant ($P_d = V \times J$, où J est la densité de courant).

3.1.17**impédance totale**

pertes dépendant de la fréquence dues aux effets ohmiques, d'activation, de diffusion et de concentration

3.1.18**résistance totale**

partie réelle de la limite de basse fréquence de l'impédance totale qui est identique à la pente de la tangente à la courbe $I-V$

3.1.19**rapport stœchiométrique**

rapport entre le nombre de moles de gaz réactant d'écoulement par unité de temps et celui dont a besoin la réaction électrochimique

Note 1 à l'article: Les termes "rapport stœchiométrique" et "utilisation de gaz réactant" sont liés. L'inverse de la fraction du gaz utilisé est le rapport stœchiométrique.

3.2 Symboles

Le Tableau 1 montre les symboles et les unités utilisés dans la présente spécification technique.

Tableau 1 – Symboles

Symbole	Définition	Unité
a	Limite d'erreur définie par la spécification de l'instrument	**
f_a	Débit de gaz d'anode	l/min (NTP)
f_c	Débit de gaz de cathode	l/min (NTP)
f_j	Débit de composant de combustible j dans le gaz d'anode	l/min (NTP)
I	Courant	A
J	Densité de courant	A/cm ²
n	Nombre d'électrons transférés	
N	Nombre de piles d'une connexion série	

Symbole	Définition	Unité
p_a	Pression absolue du gaz d'anode	kPa
p_c	Pression absolue du gaz de cathode	kPa
P	Puissance de sortie	W
P_d	Densité de puissance de sortie	W/cm ²
t	Temps	s, min, h
T_{op}	Température de fonctionnement de l'entité d'assemblage de cellules/piles	°C
u_l	Incertitude type composée pour les instruments	**
$u_{l,i}$	Incertitude type pour l'instrument i	**
U_f	Utilisation de combustible efficace	%
U_{o2}	Utilisation d'oxygène efficace	%
U_l	Incertitude d'instrument élargie	**
V	Tension	V
x_i	Fraction molaire normalisée du composant i	mol%
x_i^*	Fraction molaire non normalisée du composant i	mol%
ζ_j	Taux de conversion d'hydrocarbures pour le composant d'hydrocarbure j	%
** Indique le point de variation de l'unité selon la spécification.		

4 Conditions générales de sécurité

Une cellule élémentaire à combustible active utilise des gaz oxydants et combustibles. Ces gaz sont généralement stockés dans des conteneurs haute pression. La cellule élémentaire à combustible proprement dite peut être utilisée à des pressions supérieures à la pression atmosphérique. Les personnes en charge des essais sur l'entité d'assemblage de cellules/piles doivent être formées et avoir acquis de l'expérience en matière d'utilisation de systèmes d'essai et particulièrement en termes de règles de sécurité impliquant du matériel électrique et des gaz comprimés réactifs.

Le personnel d'essai est chargé d'obtenir et de suivre tous les codes de sécurité applicables, ainsi que les règles de l'art de l'ingénierie associées au système d'essai, à l'installation, aux combustibles (avec une attention particulière pour les gaz comprimés) et aux produits d'échappement qu'il utilise.

Les matériaux compatibles avec l'emploi et le stockage des gaz réactants doivent être utilisés pendant les essais. Il convient de respecter les codes et les normes de sécurité locaux en matière d'emploi d'hydrogène, d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone.

En résumé, une utilisation en toute sécurité du poste d'essai exige une formation et une expérience techniques appropriées, ainsi que des installations et des équipements de sécurité, autant d'éléments qui ne relèvent pas du domaine d'application de la présente spécification technique.

5 Entité d'assemblage de cellules/piles

Elle comprend une cellule ou une pile, une alimentation en gaz, des conducteurs de courant, ainsi que d'autres périphériques nécessaires pour les essais de production de puissance. L'entité d'assemblage de cellules/piles doit comporter un ou plusieurs points de mesure de la

température et de la tension, ainsi qu'un ensemble de points conducteurs de courant, autant d'éléments que le fabricant est tenu de spécifier.

Comme le montre l'Annexe A, la limite d'une entité d'assemblage de cellules/piles couvre l'orifice d'alimentation de gaz d'anode, l'orifice d'alimentation de gaz de cathode, le point de mesure de la température, les points conducteurs de courant, les points de mesure de la tension, ainsi que les points d'application de charge mécanique.

Certaines entités d'assemblage de cellules/piles peuvent ne pas comporter d'orifice d'échappement du gaz d'anode ou de cathode, du fait de la configuration des piles. Dans ce type de cas, le circuit du débit gazeux et ses éléments constitutifs doivent être déterminés par la méthode recommandée par le fabricant. La méthode d'application des charges doit être également fondée sur la recommandation du fabricant. La température maximale de fonctionnement définie par le fabricant ne doit pas être dépassée.

Lorsque les composants d'une entité d'assemblage de cellules/piles autres qu'une cellule/pile ne sont pas spécifiés par le fabricant, les éléments suivants au minimum doivent être décrits dans le rapport d'essai:

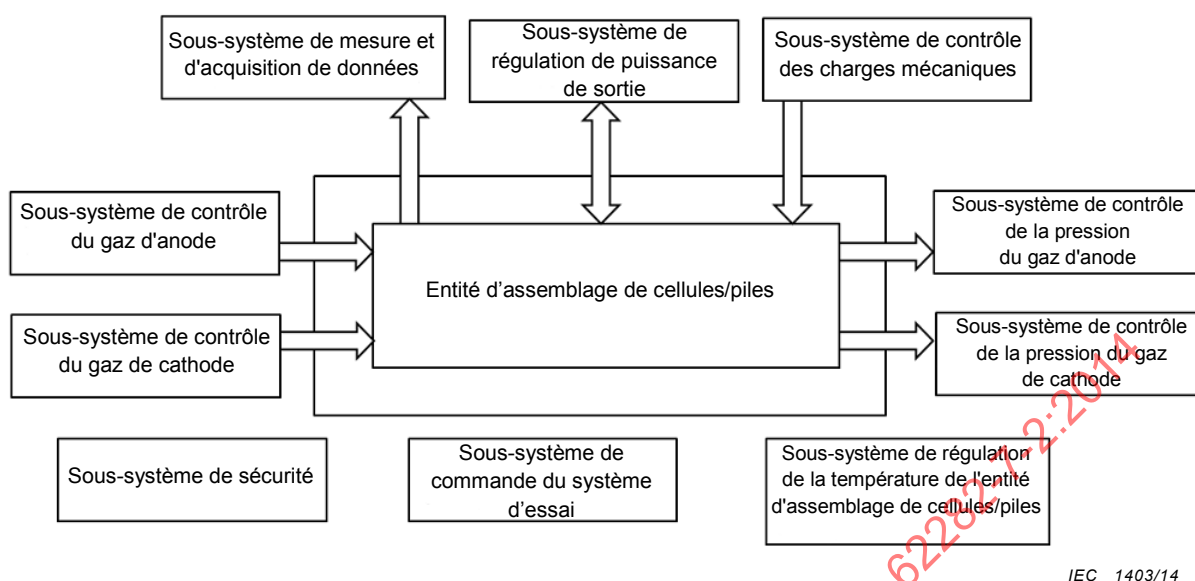
- a) matériaux et géométrie des composants périphériques à utiliser pour les essais;
- b) circuits et sens d'écoulement des gaz d'anode et de cathode;
- c) emplacements de mesure de température, d'application de charges mécaniques, de mesure de la tension et des conducteurs de courant;
- d) importance de la charge mécanique;
- e) configuration de l'entité d'assemblage et de sa méthode d'assemblage.

6 Système d'essai

6.1 Sous-systèmes du système d'essai

6.1.1 Généralités

Comme indiqué à la Figure 1, un système d'essai comprend des sous-systèmes de contrôle du gaz d'anode et du gaz de cathode, un sous-système de régulation de la température de l'entité d'assemblage de cellules/piles, un sous-système de régulation de puissance de sortie, un sous-système de mesure et d'acquisition de données, ainsi qu'un sous-système de sécurité. Il peut également inclure un sous-système de contrôle des charges mécaniques, un sous-système de contrôle de la pression des gaz d'anode et de cathode et/ou un sous-système de commande du système d'essai qui commande l'ensemble du système d'essai, si nécessaire.



IEC 1403/14

Figure 1 – Système d'essai

6.1.2 Sous-système de contrôle du gaz d'anode

Ce sous-système régule le débit, contrôle la composition et régule la température du gaz d'anode fourni à l'entité d'assemblage de cellules/piles. Lorsqu'il est nécessaire de maintenir la composition du gaz sur toute la longueur de la tuyauterie, une attention particulière doit alors être accordée aux matériaux, à la température, au diamètre intérieur et à longueur de la tuyauterie. Si nécessaire, la tuyauterie doit être chauffée et/ou isolée thermiquement afin d'éviter toute condensation de vapeur d'eau.

Il convient de veiller à éviter l'occurrence d'autres phénomènes, tels que les dépôts de carbone, et l'évaporation et le transport de matériaux indésirables dans les flux gazeux, tels que le chrome.

6.1.3 Sous-système de contrôle du gaz de cathode

Ce sous-système régule le débit, contrôle la composition et régule la température du gaz de cathode fourni à l'entité d'assemblage de cellules/piles.

Il convient de veiller à éviter l'occurrence d'autres phénomènes, tels que l'évaporation et le transport de matériaux indésirables dans les flux gazeux, tels que le chrome.

6.1.4 Sous-système de régulation de la température de l'entité d'assemblage de cellules/piles

Ce sous-système régule, au moins, la température du four électrique ou de l'entité. Il maintient la température de fonctionnement. Le four électrique doit être choisi de manière à maintenir la répartition de la température dans les limites de niveau de tolérance indiquées. Il convient de s'efforcer de réduire au minimum le bruit électrique émis par le four électrique lorsqu'il produit de la chaleur. Il est supposé que tous les systèmes d'essai utilisent un four électrique pour des raisons de simplicité et de sécurité.

6.1.5 Sous-système de régulation de puissance de sortie

Ce sous-système règle le courant ou la tension de sortie de l'entité d'assemblage de cellules/piles.

6.1.6 Sous-système de mesure et d'acquisition de données

Ce sous-système acquiert et enregistre la température, le courant, la tension, le débit des gaz d'anode et de cathode, et de manière facultative, les conditions environnementales (température ambiante, humidité relative et pression atmosphérique) de l'entité d'assemblage de cellules/piles à l'aide de la méthode indiquée. Si nécessaire, il acquiert et enregistre également la charge mécanique appliquée sur la cellule, la température, la composition et la pression des gaz de cathode et d'anode, le débit, la composition, la température et la pression des gaz d'anode et de cathode d'échappement, ainsi que les données d'impédance de l'entité d'assemblage de cellules/piles, etc. à l'aide de la méthode indiquée.

6.1.7 Sous-système de sécurité

Ce sous-système fonctionne comme un détecteur et un système d'alarme de dysfonctionnement du système d'essai sur la base de paramètres et de critères prédéfinis. Lorsqu'il détecte une grave anomalie, il doit alors établir automatiquement un état sûr interne au système d'essai. Il convient de purger l'anode avec un gaz inerte, tel que l'azote, qui peut également contenir de l'hydrogène à des concentrations inférieures à la limite inférieure d'inflammabilité.

6.1.8 Sous-système de contrôle de la charge mécanique

Ce sous-système facultatif régule la charge mécanique appliquée pour renforcer le contact entre les composants de l'entité d'assemblage de cellules/piles. Il convient que le sous-système soit suffisamment robuste pour appliquer la charge mécanique exigée dans les conditions d'essai et pour maintenir cette charge pour un fonctionnement de longue durée.

6.1.9 Sous-système de contrôle de la pression des gaz d'anode et de cathode

Ce sous-système facultatif applicable aux gaz d'anode et de cathode régule la pression de ces gaz au moyen d'une vanne de contrepression, etc.

6.1.10 Sous-système de commande du système d'essai

Ce sous-système assure la commande intégrée de chaque sous-système de commande et de chaque sous-système d'acquisition de données.

6.2 Variation maximale des éléments de commande du système d'essai

La variation tolérable de chaque élément de commande du système d'essai doit s'inscrire dans les plages suivantes:

Dans le cas du réglage du courant:	courant: ± 1 % par rapport au point de valeur assignée
Dans le cas du réglage de la tension:	tension: ± 1 % par rapport à la valeur de consigne
Température:	$\pm 1,0$ % par rapport à la valeur de consigne

NOTE 1 La variation de température à la valeur de consigne de moins de ± 5 °C augmente la reproductibilité.

Débit des gaz d'anode et de cathode:	± 1 % par rapport à la valeur assignée
Composition du gaz d'anode:	$\pm 2,0$ mol % pour H_2 , N_2 ; $\pm 2,0$ mol % pour CO , CO_2 , CH_4 ; $\pm 5,0$ mol % pour H_2O (concentration en vapeur d'eau)

Dans le cas d'une humidification par ajoutage/arrosage: Température du point de rosée: ± 1 °C

NOTE 2 A des concentrations en vapeur d'eau supérieures à 10 mol %, un ajuteur (arroseur) peut engendrer une plus grande incertitude.

Composition du gaz de cathode:	$\pm 1,0$ mol % de la concentration en O_2 cible
Lorsque les pressions des gaz d'anode et de cathode sont à contrôler, pressions des gaz d'anode et de cathode:	± 1 % de la condition assignée, lorsque la pression assignée est supérieure ou égale à 0,3 MPa; et 3 kPa, lorsque la pression assignée est inférieure à 0,3 MPa

7 Instruments et méthodes de mesure

7.1 Généralités

Les instruments de mesure doivent satisfaire à l'exigence de 7.2. Au minimum, le débit et la composition des gaz d'anode et de cathode, ainsi que la température, la tension et le courant de l'entité d'assemblage de cellules/piles doivent être mesurés. Des mesures supplémentaires doivent être effectuées sur la base des paramètres et/ou des conditions d'essai. Certains des éléments suivants indiqués en 7.3 ou 7.4 peuvent ne pas être mesurables dans le cas d'une entité d'assemblage de cellules/piles dépourvue d'orifice d'échappement du gaz d'anode ou de cathode.

7.2 Incertitude des instruments

L'incertitude élargie de chaque instrument de mesure (facteur d'élargissement $k = 2$) au moment de l'étalonnage ou l'incertitude estimée à partir de la classe d'instrument doit satisfaire aux exigences suivantes:

NOTE Le facteur d'élargissement est défini dans le Guide ISO/IEC 98-3.

Courant:	± 1 % par rapport à la valeur assignée
Tension:	$\pm 0,5$ % par rapport à la tension en circuit ouvert
Température:	$\pm 1,0$ % du relevé
Débits des gaz d'anode et de cathode:	± 2 % de la valeur assignée
Pressions des gaz d'anode et de cathode:	± 1 % du relevé
Composition du gaz d'anode:	± 2 mol % pour H_2 , H_2O et N_2 ; ± 1 mol % pour CO , CO_2 et CH_4
Composition du gaz de cathode:	$\pm 0,3$ mol % pour O_2 (équilibre N_2)

7.3 Gaz d'anode

7.3.1 Débit du gaz d'anode

Il doit être mesuré au moyen de débitmètres massiques, de débitmètres volumétriques ou de débitmètres à turbine. Le débitmètre doit être sélectionné en tenant compte des espèces contenues dans le gaz fourni, de la plage de débits et de l'incertitude admissible du débitmètre. Lorsque les mesures sont volumétriques, elles doivent être converties en débit massique par la mesure de la température et de la pression du gaz, ou de la densité de gaz au voisinage des débitmètres. Il convient d'évaluer l'incertitude de mesure pour les gaz secs conformément à l'ISO 5168, l'ISO/TR 7066-1¹ ou l'ISO 7066-2.

7.3.2 Composition du gaz d'anode

Il convient de mesurer la composition du gaz d'anode lors de la mesure des performances de l'entité d'assemblage de cellules/piles. Lorsque cela n'est toutefois pas possible, la

¹ Supprimée.

composition du gaz d'anode doit être mesurée lors de la préparation à l'essai de performance dans les mêmes conditions que celles de l'essai de performance des cellules.

Lorsque le gaz d'anode est fourni dans l'une des conditions a) à d) suivantes, et si le tuyau d'alimentation en gaz ne comporte pas de réacteurs, tels qu'un reformeur, et s'il est confirmé qu'il ne modifie pas la composition du gaz de manière significative, la composition peut être calculée sur la base de la table de composition publiée par le fournisseur de gaz et des valeurs fournies par chaque débitmètre, conformément à l'ISO 6145-7:

- a) un gaz à composition unique tel que l'hydrogène est fourni;
- b) un gaz mixte de composition connue est fourni;
- c) le gaz d'anode est fourni par mélange des gaz composants de manière régulée au moyen de plusieurs débitmètres;
- d) les gaz décrits en b) et c) ci-dessus, sont fournis sous forme combinée.

Le gaz d'anode doit être échantillonné à proximité de l'orifice d'alimentation en gaz d'anode de l'entité d'assemblage de cellules/piles et analysé à l'aide d'un dispositif de spectroscopie infrarouge, d'un spectromètre de masse, d'un chromatographe en phase gazeuse ou d'un dispositif similaire. L'échantillon de gaz doit être acheminé de son point d'origine au point d'analyse selon une méthode qui réduit au minimum les variations de composition. Ainsi, le matériau, la température, le diamètre et la longueur de la tubulure doivent être choisis avec soin afin de réduire au minimum la variation de composition dans la tubulure d'échantillonnage. Si nécessaire, cette dernière doit être chauffée afin d'éviter la condensation de la vapeur d'eau.

Lorsque la vapeur d'eau est susceptible d'altérer la mesure, retirer l'eau de l'échantillon de gaz ou diluer celui-ci avec de l'argon ou un gaz inerte similaire.

Le résultat de ce type d'analyse pour le composant de gaz i , exprimé sous la forme x_i^* (mol %) (concentration non normalisée), doit être normalisé afin d'obtenir une concentration normalisée x_i (mol %), à l'aide de l'équation suivante:

$$x_i = 100 \frac{x_i^*}{\sum_w x_w^*} \quad (1)$$

où $\sum_w x_w^*$ représente la somme des concentrations non normalisées de tous les gaz composants soumis à l'analyse.

L'analyseur de gaz doit être étalonné à l'aide d'un gaz étalon de rapport massique connu.

L'incertitude de mesure doit être évaluée conformément à la série ISO 6974, l'ISO 6141, l'ISO 6142 ou l'ISO 6143.

7.3.3 Température du gaz d'anode

La température du gaz doit être mesurée à proximité de l'orifice d'alimentation du gaz d'anode de l'entité d'assemblage de cellules/piles au moyen d'un couple thermoélectrique ordinaire ou d'un couple thermoélectrique gainé et d'un conducteur d'extension de type et de classe conformément à l'IEC 60584-1, l'IEC 60584-2, l'IEC 60584-3 ou l'IEC 61515. En présence d'un réacteur tel qu'un reformeur, il convient de mesurer également la température du gaz à la sortie dudit réacteur.

NOTE Il peut y avoir des différences importantes entre la température de la paroi de tube et la température du gaz en vrac.

Lorsqu'il est difficile de mesurer la température du gaz au cours de l'essai de performance des cellules, la température du gaz d'anode doit être mesurée lors de la préparation à l'essai de performance dans les mêmes conditions que celles dudit essai.

7.3.4 Pression du gaz d'anode

Elle doit être mesurée en amont de l'orifice d'alimentation en gaz d'anode de l'entité d'assemblage de cellules/piles au moyen d'un capteur de pression, d'un manomètre, d'un tube de Bourdon ou d'un instrument similaire étalonné. L'instrument de mesure doit être situé de manière à réduire l'incertitude au minimum compte tenu de toute perte de pression dans la tuyauterie, de la température de la tuyauterie et d'autres facteurs. On doit veiller à éviter toute condensation de la vapeur d'eau pendant la mesure. Une méthode peut consister à mesurer la pression par injection d'une très faible quantité d'azote sec ou de gaz similaire dans la tuyauterie, à proximité de l'instrument de mesure.

7.3.5 Débit du gaz d'anode d'échappement

Il doit être mesuré au moyen de débitmètres massiques ou volumétriques, voire de débitmètres à turbine après mise en œuvre d'un moyen qui empêche la condensation de vapeur d'eau d'altérer la stabilité du débit de gaz d'anode ou après retrait de l'eau du débit gazeux. Lorsque des mesures volumétriques sont effectuées, elles doivent être converties en débit massique par la mesure de la température et de la pression du gaz ou de la densité de gaz au voisinage des débitmètres. En variante, le débit du gaz d'anode d'échappement peut être calculé à partir des concentrations de composants du gaz d'anode d'échappement, de la concentration et du débit du gaz traceur, en ajoutant avec précision une faible quantité de gaz non contenu dans le gaz d'anode d'échappement comme gaz traceur. L'analyseur de gaz doit être étalonné à l'aide d'un gaz étalon de rapport massique connu. L'incertitude de mesure doit être évaluée conformément à la série ISO 6974, l'ISO 6141, l'ISO 6142 ou l'ISO 6143.

Le gaz d'échappement doit être manipulé avec précaution pour des raisons de sécurité et environnementales, étant donné qu'il peut toujours contenir de l'hydrogène, du monoxyde de carbone et des hydrocarbures.

7.3.6 Composant du gaz d'anode d'échappement

Le gaz d'anode d'échappement doit être échantillonné à proximité de l'orifice d'échappement du gaz d'anode de l'entité d'assemblage de cellules/piles. L'échantillon doit être analysé au moyen d'un spectrophotomètre infrarouge, d'un spectromètre massique, d'un chromatographe en phase gazeuse ou d'un dispositif similaire. Lorsque la vapeur d'eau est susceptible d'altérer la mesure, retirer l'eau de l'échantillon de gaz ou diluer celui-ci avec de l'argon ou un gaz similaire. Lors de la mesure, une attention particulière doit être accordée aux matériaux, à la température, au diamètre intérieur et à la longueur de la tuyauterie afin de s'assurer que les variations éventuelles de la composition du gaz qui peuvent se produire dans la tuyauterie ne sont pas importantes. En particulier, la tuyauterie doit être chauffée si nécessaire afin d'empêcher que toute condensation de la vapeur d'eau ne s'y produise. L'analyseur de gaz doit être étalonné à l'aide d'un gaz étalon de rapport massique connu.

7.3.7 Température du gaz d'anode d'échappement

La température du gaz doit être mesurée à proximité de l'orifice d'échappement du gaz d'anode de l'entité d'assemblage de cellules/piles en choisissant un couple thermoélectrique ordinaire ou un couple thermoélectrique gainé et un conducteur d'extension de type et de classe appropriés et conformes à l'IEC 61515, l'IEC 60584-1, l'IEC 60584-2 ou l'IEC 60584-3. Lorsqu'il est difficile de mesurer la température du gaz au cours de l'essai de performance des cellules, la température du gaz d'anode d'échappement doit être mesurée lors de la préparation à l'essai de performance dans les mêmes conditions que celles dudit essai.

NOTE Il peut y avoir des différences importantes entre la température de la paroi de tube et la température du gaz en vrac.

7.3.8 Pression du gaz d'anode d'échappement

Elle doit être mesurée en aval de l'orifice d'échappement du gaz d'anode de l'entité d'assemblage de cellules/piles au moyen d'un capteur de pression, d'un manomètre, d'un tube de Bourdon ou d'un instrument similaire. Il convient que l'instrument de mesure soit situé de manière à réduire l'incertitude au minimum compte tenu de toute perte de pression dans la tuyauterie, de la température (du gaz) de la tuyauterie et d'autres facteurs. On doit veiller à éviter toute condensation de la vapeur d'eau pendant la mesure. Une méthode peut consister à mesurer la pression par injection d'une très faible quantité d'azote sec ou de gaz similaire dans la tuyauterie, à proximité de l'instrument de mesure.

7.4 Gaz de cathode

7.4.1 Débit du gaz de cathode

Il doit être mesuré au moyen de débitmètres massiques, de débitmètres volumétriques ou de débitmètres à turbine. Lorsque des mesures volumétriques sont effectuées, elles doivent être converties en débit massique par la mesure de la température et de la pression du gaz ou de la densité de gaz au voisinage des débitmètres. Le débitmètre doit être sélectionné en tenant compte de la plage de débits prévue et de l'incertitude admissible du débitmètre. L'incertitude doit être évaluée conformément à l'ISO 5168, l'ISO/TR 7066-1² ou l'ISO 7066-2.

7.4.2 Composant du gaz de cathode

Pour la composition du gaz de cathode, la concentration en oxygène doit être mesurée au moyen d'un chromatographe en phase gazeuse ou d'un appareil de mesure de la concentration en oxygène. Il convient que le gaz de cathode consiste en de l'air comprimé ou en un gaz en bouteille propre (exempt d'huile). Lorsqu'on utilise un mélange de gaz en bouteille, les valeurs décrites sur son certificat de composition publié par le fournisseur de gaz peuvent être utilisées. L'incertitude de l'instrument doit être évaluée conformément à la série ISO 6974, l'ISO 6141, l'ISO 6142, l'ISO 6143 ou l'ISO 6145-7.

Lorsqu'il est nécessaire de mesurer l'humidité, un appareil de mesure du point de rosée ou de la teneur en eau, ou un chromatographe en phase gazeuse doit être utilisé lors de la régulation de la température du gaz afin d'empêcher toute condensation de vapeur d'eau.

7.4.3 Température du gaz de cathode

La température du gaz doit être mesurée à proximité de l'orifice d'alimentation en gaz de cathode de l'entité d'assemblage de cellules/piles en choisissant un couple thermoélectrique ordinaire ou un couple thermoélectrique gainé et un conducteur d'extension de type et de classe appropriés conformément à l'IEC 60584-1, l'IEC 60584-2, l'IEC 60584-3 ou l'IEC 61515.

NOTE Il peut y avoir des différences importantes entre la température de la paroi de tube et la température du gaz en vrac.

Lorsqu'il est difficile de mesurer la température du gaz au cours de l'essai de performance des cellules, la température du gaz de cathode doit être mesurée lors de la préparation à l'essai de performance dans les mêmes conditions que celles dudit essai.

7.4.4 Pression du gaz de cathode

Elle doit être mesurée en amont de l'orifice d'alimentation en gaz de cathode de l'entité d'assemblage de cellules/piles au moyen d'un capteur de pression, d'un manomètre, d'un tube de Bourdon ou d'un instrument similaire. Il convient que l'instrument de mesure soit situé de manière à réduire l'incertitude au minimum compte tenu de toute perte de pression dans la tuyauterie, de la température de la tuyauterie et d'autres facteurs.

² Supprimée.

7.4.5 Débit du gaz de cathode d'échappement

Il doit être mesuré au moyen d'un débitmètre massique, de débitmètres volumétriques ou de débitmètres à turbine après refroidissement du gaz. Lorsque des mesures volumétriques sont effectuées, elles doivent être converties en débit massique par la mesure de la température et de la pression du gaz ou de la densité de gaz au voisinage des débitmètres. Le débitmètre doit être sélectionné en tenant compte de la plage de débits prévue et de l'incertitude admissible de l'instrument. L'incertitude de l'instrument doit être évaluée conformément à la série ISO 6974, l'ISO 6141, l'ISO 6142, l'ISO 6143 ou l'ISO 6145-7.

7.4.6 Composant du gaz de cathode d'échappement

Pour la composition du gaz de cathode d'échappement, la concentration en oxygène doit être mesurée au moyen d'un chromatographe en phase gazeuse ou d'un appareil de mesure de la concentration en oxygène après refroidissement du gaz. Lorsqu'il est nécessaire de mesurer une concentration en eau extrêmement faible, un appareil de mesure du point de rosée ou de la teneur en eau, ou un chromatographe en phase gazeuse doit être utilisé lors de la régulation de la température du gaz afin d'empêcher toute condensation de vapeur d'eau.

7.4.7 Température du gaz de cathode d'échappement

Elle doit être mesurée à proximité de l'orifice d'échappement du gaz de cathode de l'entité d'assemblage de cellules/piles en choisissant un couple thermoélectrique ordinaire ou un couple thermoélectrique gainé et un conducteur d'extension de type et de classe appropriés conformément à l'IEC 60584-1, l'IEC 60584-2, l'IEC 60584-3 ou l'IEC 61515. Lorsqu'il est difficile de mesurer la température du gaz au cours de l'essai de performance des cellules, la température du gaz de cathode d'échappement doit être mesurée lors de la préparation à l'essai de performance dans les mêmes conditions que celles dudit essai.

NOTE Il peut y avoir des différences importantes entre la température de la paroi de tube et la température du gaz en vrac.

7.4.8 Pression du gaz de cathode d'échappement

Elle doit être mesurée en aval de l'orifice d'échappement du gaz de cathode de l'entité d'assemblage de cellules/piles au moyen d'un capteur de pression, d'un manomètre, d'un tube de Bourdon ou d'un instrument similaire. Il convient que l'instrument de mesure soit situé de manière à réduire l'incertitude au minimum compte tenu de toute perte de pression dans la tuyauterie, de la température de la tuyauterie et d'autres facteurs.

7.5 Tension de sortie

Un voltmètre doit être raccordé aux points de mesure de la tension, comme décrit à l'Article 5. La tension ainsi mesurée doit être considérée comme étant la tension de la cellule/pile. Le câble de raccordement doit être suffisamment durable pour les conditions d'essai. La force électromotrice au point de raccordement doit faire l'objet d'une attention particulière.

7.6 Courant de sortie

Un galvanostat ou une charge électrique raccordé(e) aux points conducteurs de courant, comme décrit à l'Article 5, et/ou un capteur de courant, comme une résistance shunt située sur le circuit de courant, doivent être utilisés pour mesurer le courant en transmettant sa sortie à un instrument de mesure/enregistrement. Le câble de raccordement doit être choisi pour des matériaux et une géométrie appropriés compte tenu des conditions d'essai et de la chute de tension potentielle dans le câble.

7.7 Température de l'entité d'assemblage de cellules/piles

Un couple thermoélectrique ordinaire ou un couple thermoélectrique gainé et un conducteur d'extension de type et de classe appropriés doivent être choisis conformément à l'IEC 60584-1, l'IEC 60584-2, l'IEC 60584-3 ou l'IEC 61515. Ils doivent être placés au point de

mesure de la température tel que décrit à l'Article 5 et raccordés à un enregistreur ou un dispositif similaire pour mesure. En présence de deux points de mesure de la température ou plus, la température de l'entité et sa répartition doivent être obtenues par la méthode de calcul recommandée par le fabricant.

7.8 Charge mécanique

Une charge mécanique appliquée selon les recommandations du fabricant doit être mesurée.

7.9 Impédance totale

L'impédance totale de l'entité d'assemblage de cellules/piles doit être mesurée au moyen soit de la méthode d'impédance c.a. ou de la méthode d'interruption du courant. Une ligne de mesure appropriée doit être utilisée afin d'assurer l'existence de données de haute qualité sur toute la gamme de fréquences analysée.

7.10 Conditions ambiantes

Pour définir les conditions ambiantes, la température ambiante, la pression et l'humidité relative doivent être mesurées. L'intervalle d'échantillonnage doit être la valeur spécifiée dans l'ISO 8756 ou une valeur inférieure.

8 Préparation aux essais

8.1 Généralités

Le type d'entité d'assemblage de cellules/piles à soumettre à l'essai, le nombre d'échantillons, les paramètres et les conditions d'essai doivent être déterminés.

Chaque instrument de mesure doit faire l'objet d'une vérification de son dernier étalonnage, ainsi que de l'incertitude dans les conditions d'étalonnage, ou faire l'objet d'une estimation à partir de la classe de l'instrument et de sa dépendance à l'égard des conditions environnementales afin d'évaluer l'incertitude de l'instrument. La méthode et le cycle d'étalonnage et de remplacement doivent être conçus afin de s'assurer que l'incertitude de mesure n'augmente pas.

Les composants des gaz d'anode et de cathode et leurs principales impuretés doivent être vérifiés. Comme décrit à l'Article 7, un essai préliminaire doit être effectué pour vérifier la composition et la température des gaz afin de s'assurer que les compositions de gaz sont établies dans les limites de l'incertitude prévue et que la température du gaz d'alimentation n'affecte pas la température de l'entité. Par ailleurs, la procédure et les conditions d'essai, ainsi que les critères d'évaluation applicables à un état stable, notamment, doivent être déterminés sur la base des résultats de l'essai préliminaire et d'autres facteurs.

8.2 Conditions et gamme normales d'essai

Les conditions normales d'essai et la gamme d'essai typique qui sont recommandées par le fabricant doivent être examinées selon les paramètres suivants afin de déterminer les conditions et la gamme d'essai:

- a) température de l'entité d'assemblage de cellules/piles;
- b) répartition admissible de la température de l'entité d'assemblage de cellules/piles (en présence de plusieurs points de mesure);
- c) débit du gaz d'anode;
- d) composition du gaz d'anode;
- e) pression du gaz d'anode;
- f) débit du gaz de cathode;

- g) composition du gaz de cathode;
- h) pression du gaz de cathode;
- i) utilisation de combustible efficace;
- j) utilisation d'oxygène efficace;
- k) courant ou densité de courant;
- l) tension minimale de l'entité d'assemblage de cellules/piles;
- m) courant minimum de l'entité d'assemblage de cellules/piles (avec une utilisation de combustible efficace constante et une charge opérationnelle minimale, voir Annexe E pour de plus amples informations);
- n) courant maximum de l'entité d'assemblage de cellules/piles (avec une utilisation de combustible efficace constante). Un dommage dû à une dégradation excessive est possible au-delà de cette valeur;
- o) charge mécanique.

8.3 Composants et impuretés des gaz d'anode et de cathode

Lorsque des gaz sont utilisés pour préparer le gaz d'anode, le niveau de pureté ou les composants et les principales impuretés de chaque gaz doivent être vérifiés par les tables de composition publiées par les fournisseurs de gaz respectifs ou par le biais d'une analyse. Lorsque le gaz d'anode est produit à partir d'un combustible liquide, sa densité, sa teneur en carbone, hydrogène et oxygène, ainsi que sa teneur en impuretés, telles que le soufre, doivent être vérifiées par la table de composition publiée par le fournisseur de gaz ou par le biais d'une analyse conformément à l'ISO 12185 ou l'ISO 4260.

La pureté ou les composants et les principales impuretés du gaz de cathode doivent être vérifiés par la table de composition publiée par le fournisseur de gaz ou par le biais d'une analyse. En cas d'utilisation d'un compresseur, l'air comprimé doit être exempt d'huile et de particules conformément à l'ISO 8573-1.

Le résultat de chaque vérification ou analyse doit être décrit dans le rapport d'essai.

8.4 Conditions fondamentales de la procédure d'essai

Les conditions de démarrage, telles que la vitesse d'échauffement et les conditions ambiantes au cours de la rampe d'échauffement, l'état de l'anode (c'est-à-dire le niveau de réduction de l'oxyde de nickel en nickel), et les conditions d'arrêt, telles que la vitesse de refroidissement et les conditions ambiantes au cours de la rampe de refroidissement, doivent être basées sur celles recommandées par le fabricant ou sur les résultats des essais préliminaires.

8.5 Confirmation du vieillissement de l'entité

Le vieillissement de l'entité d'assemblage de cellules/piles doit être déterminé sur la base du vieillissement recommandé par le fabricant, ainsi que sur les essais préliminaires à réaliser, afin de s'assurer que la dérive de sortie au moment de la mesure n'est pas importante.

8.6 Confirmation des critères d'état stable

Le niveau de tolérance de variation doit être déterminé pour le courant ou la tension de sortie de l'entité d'assemblage de cellules/piles, et les critères d'évaluation d'un état stable doivent être déterminés par le biais d'essais préliminaires et d'autres essais.

Les critères d'évaluation d'un état stable doivent être décrits dans le rapport d'essai.

8.7 Méthode d'acquisition de données

Les essais préliminaires doivent être réalisés tout en tenant compte de la variation de chaque paramètre d'essai et de la fréquence d'échantillonnage de chaque instrument de mesure,

notamment, afin de déterminer l'intervalle d'échantillonnage et le nombre d'échantillonnages et de mesures. L'intervalle d'échantillonnage (par exemple, 1 s) doit être suffisamment court pour observer la variation du paramètre mesuré avec une résolution temporelle suffisante. Le nombre d'échantillonnages et de répétitions pour une mesure unique doit être déterminé de sorte que la période de mesure totale devienne suffisamment plus longue que le cycle de variation dominant de chaque paramètre d'essai.

9 Procédure d'essai

9.1 Installation

La procédure d'installation d'essai doit être la suivante:

- a) Vérifier chaque sous-système de contrôle ou de mesure afin de détecter toute fuite potentielle. Il existe de nombreuses méthodes de vérification de fuite, telles que les détecteurs du point de bulle et les détecteurs de fuite à l'hélium. Le choix de la méthode dépend de l'équipement utilisé. Il convient de vérifier le bon fonctionnement du matériel d'essai par une comparaison de ses performances avec les paramètres spécifiés en 7.2.
- b) Préparer une entité d'assemblage de cellules/piles composée d'une ou de plusieurs cellules, d'un passage des gaz, d'interconnecteurs, de collecteurs de courant, d'isolants et d'autres composants conformément à la méthode et à la procédure d'assemblage recommandées par le fabricant. Avant de raccorder la cellule/pile au banc d'essai, mesurer la résistance entre les points conducteurs de courant de l'anode et de la cathode afin de déterminer la présence ou non d'un court-circuit. Mesurer la résistance entre les points de mesure de la tension des cellules afin de déterminer s'ils sont isolés électriquement. Mesurer les résistances entre cellules. Il convient que ces valeurs n'indiquent pas la présence d'un court-circuit, mais qu'elles soient, en revanche, similaires à celles spécifiées par le fabricant.
- c) Placer l'entité d'assemblage de cellules/piles dans un sous-système de régulation de la température et installer le câblage de mesure de la tension et des conducteurs de courant, la charge mécanique et les couples thermoélectriques, ainsi que la tuyauterie d'alimentation et d'échappement des gaz. Connecter les câbles à leurs sous-systèmes correspondants. S'assurer que l'isolation entre les couples thermoélectriques et la cellule/pile est correcte. Il convient également que la charge mécanique et la cellule/pile soient isolées électriquement.
- d) Vérifier les raccords de tuyauterie de gaz pour toute fuite potentielle (voir 9.1.a).
- e) Si nécessaire, vérifier l'isolation à la terre du câblage. Il est recommandé de vérifier l'isolation préalablement au raccordement du sous-système de contrôle de sortie ou du sous-système de mesure. De plus, un câblage correct doit faire l'objet d'une vérification au niveau des raccords de joints.
- f) Une fois achevées toutes les vérifications susmentionnées, le sous-système de mesure est soumis à une vérification de bon fonctionnement.

9.2 Conditionnement initial

L'entité d'assemblage de cellules/piles doit être démarrée au taux d'élévation de température et dans les conditions ambiantes spécifiées en 8.4 et utilisée jusqu'à ce qu'elle atteigne l'état stable après avoir subi une réduction et un conditionnement de l'anode.

9.3 Arrêt

La procédure d'arrêt doit être lancée au taux de diminution de température indiqué et dans les conditions ambiantes spécifiées en 8.4. Sauf disposition contraire, on doit diminuer la température dans les conditions déterminées par l'utilisateur, sur la base des essais préliminaires ou comme indiqué par le fabricant. Pendant cette période, le débit d'air en direction de l'électrode oxydoréductrice est maintenu et l'hydrogène dilué avec de l'azote (ou un autre gaz inerte) s'écoule en direction de l'électrode de combustible. La concentration en hydrogène dans ce mélange de gaz doit être inférieure à la limite inférieure d'explosivité.

10 Essai de performance

10.1 Essai de puissance assignée

10.1.1 Objectif

Cet essai a pour objectif de mesurer et vérifier la sortie de l'entité d'assemblage de cellules/piles dans les conditions assignées.

10.1.2 Méthode d'essai

Tous les paramètres de commande doivent être définis dans les conditions assignées, et après que l'entité d'assemblage de cellules/piles a atteint l'état stable, la tension, le courant et les autres paramètres de commande doivent être mesurés de manière répétée selon un intervalle d'échantillonnage qui permet d'obtenir le nombre d'échantillons et de mesures comme indiqué en 8.7. La valeur moyenne des mesures doit être la valeur mesurée. Inclure, de manière facultative, l'écart-type des mesures.

10.1.3 Présentation des résultats

Les résultats de mesure doivent servir à calculer la sortie de puissance assignée et être consignés dans le rapport d'essai, ainsi que la tension, le courant et les autres mesures des conditions d'essai.

10.2 Essai des caractéristiques courant-tension

10.2.1 Objectif

Cet essai a pour objectif de déterminer la dépendance des caractéristiques courant-tension eu égard à la température, la pression, la composition des gaz, le débit de gaz ou l'utilisation des gaz efficace.

10.2.2 Méthode d'essai

10.2.2.1 Essai sous débit constant

Le paramètre de commande par rapport auquel la dépendance est à mesurer, doit être défini à sa valeur initiale, tandis que les débits de gaz d'anode et de cathode, ainsi que les autres paramètres de commande, doivent être définis aux valeurs initiales des conditions d'essai. L'entité doit être utilisée jusqu'à ce que l'état stable soit atteint dans des conditions de circuit ouvert, et les caractéristiques courant-tension sont mesurées par une variation progressive du courant ou de la tension, ou par son balayage à vitesse constante. Après la mesure, le paramètre de commande est défini sur la valeur suivante et la mesure doit être répétée dans l'étendue de mesure spécifiée en 8.2.

- a) Lorsque le courant varie par pas, l'entité d'assemblage de cellules/piles doit être utilisée jusqu'à ce que l'état stable soit atteint pour chaque pas (température et tension) auquel des mesures sont effectuées sur toute la durée des intervalles d'échantillonnage comme indiqué en 8.7. La valeur moyenne de ces mesures doit être la valeur mesurée pour le pas concerné.
- b) Lorsque le courant fait l'objet d'un balayage, la vitesse de balayage doit être déterminée de sorte que la largeur maximale de l'hystérésis de tension ne dépasse pas la variation de tension à l'état stable.
- c) Lorsque la tension fait l'objet d'une régulation, le pas a) ou b) doit être appliqué avec une tension de pas ou un balayage de tension respectivement.

NOTE La signification de la largeur maximale de l'hystérésis de tension est expliquée à l'Annexe D.

10.2.2.2 Essai avec utilisation de combustible et/ou oxygène efficace constante ou rapport stœchiométrique constant

Le paramètre de commande par rapport auquel la dépendance est à mesurer, doit être défini à sa valeur initiale, tandis que l'utilisation de combustible et/ou d'oxygène efficace, ainsi que les autres paramètres de commande, doivent être définis aux valeurs initiales des conditions de fonctionnement d'essai indiquées en 8.2. L'entité doit être utilisée au courant minimum spécifié par le fabricant jusqu'à ce que l'état stable soit atteint, et les caractéristiques courant-tension doivent être mesurées par une variation par pas du courant ou de la tension. L'entité doit être utilisée avec chaque pas jusqu'à ce que l'état stable soit atteint, les mesures étant effectuées sur toute la durée d'utilisation à la fréquence d'échantillonnage indiquée en 8.7. La valeur moyenne de ces mesures doit être la valeur mesurée pour le pas concerné. Après la mesure, le paramètre de commande est défini sur la valeur suivante et la mesure doit être répétée dans l'étendue de mesure spécifiée en 8.2.

Un exemple d'enregistrement de l'essai des caractéristiques $I-V$ avec une utilisation de combustible efficace constante est donné à l'Annexe E.

10.2.3 Présentation des résultats

Les résultats doivent être exprimés sous forme d'une courbe bidimensionnelle dont l'axe horizontal représente la densité de courant ou l'utilisation de combustible efficace, ou une combinaison de la densité de courant et de l'utilisation de combustible, et l'axe vertical représente la tension de l'entité d'assemblage de cellules/piles. Cette courbe doit être incluse dans le rapport d'essai avec les autres conditions d'essai. En variante à la tension de pile, les tensions de cellule mesurées ou la tension de cellule moyenne peuvent être tracées par rapport à la densité de courant. Inclure, de manière facultative, l'écart-type des mesures.

10.3 Essai de dépendance à l'utilisation de combustible efficace

10.3.1 Objectif

Cet essai a pour objectif d'étudier la dépendance des performances de l'entité d'assemblage de cellules/piles à l'utilisation de combustible efficace et de confirmer l'utilisation de combustible efficace maximale dans des conditions de fonctionnement diverses.

10.3.2 Méthode d'essai

10.3.2.1 Généralités

L'utilisation de combustible maximale, ainsi que les conditions appliquées pour obtenir cette valeur, doivent être indiquées par le fabricant, ou déterminées par consultation entre le fabricant et l'évaluateur.

L'essai doit être réalisé soit en réduisant le débit de gaz d'anode avec un courant constant, soit en augmentant le courant à un débit de gaz d'anode constant.

10.3.2.2 Essai à courant constant

Les étapes suivantes doivent être exécutées:

- Définir l'entité d'assemblage de cellules/piles aux conditions d'essai spécifiées en 8.2, l'utiliser et vérifier qu'elle a atteint l'état stable.
- Réduire progressivement le débit de gaz d'anode jusqu'à ce que l'entité d'assemblage de cellules/piles atteigne l'utilisation de combustible efficace maximale spécifiée par le fabricant. Pour chaque étape, vérifier que la tension a atteint l'état stable et enregistrer ce dernier.
- Lorsque l'utilisation de combustible atteint la valeur efficace maximale, régler le débit de gaz d'anode pour qu'il recouvre progressivement sa valeur d'origine et enregistrer la tension. La comparaison de cette tension avec celle existante préalablement à cette étape

fournit des informations concernant le fait de déterminer si l'entité d'assemblage de cellules/piles peut ou non atteindre l'utilisation de combustible efficace maximale spécifiée par le fabricant comme réalisable uniquement pendant une courte durée. Ceci est différent de ce qui est observé en 10.4.

10.3.2.3 Essai à débit de gaz d'anode constant

Les étapes suivantes doivent être exécutées:

- a) Définir l'entité d'assemblage de cellules/piles aux conditions d'essai spécifiées, l'utiliser et vérifier qu'elle a atteint l'état stable.
- b) Augmenter le courant progressivement jusqu'à ce que l'entité d'assemblage de cellules/piles atteigne l'utilisation de combustible efficace maximale. Pour chaque étape, vérifier que la tension a atteint l'état stable et enregistrer ce dernier.
- c) Lorsque l'utilisation de combustible atteint la valeur efficace maximale, régler le courant pour qu'il recouvre progressivement sa valeur d'origine et enregistrer la tension. La comparaison de cette tension avec celle existante préalablement à cette étape fournit des informations concernant l'utilisation de combustible efficace maximale qui peut être réalisée par l'entité d'assemblage de cellules/piles uniquement pendant une courte durée. Ceci est différent de ce qui est observé en 10.4.

Il convient de déterminer à l'avance les critères de suspension de l'essai soit par des essais préliminaires, ou par consultation du fabricant afin d'éviter toute dégradation des performances ou tout dommage à l'entité d'assemblage de cellules/piles.

10.3.3 Présentation des résultats

Les résultats doivent être exprimés sous forme d'une courbe bidimensionnelle dont l'axe horizontal représente l'utilisation de combustible efficace, ou une combinaison du débit de gaz d'anode et de l'utilisation de combustible efficace dans le cas de 10.3.2.2, et cette même utilisation, ou une combinaison de la densité de courant et de l'utilisation de combustible efficace dans le cas de 10.3.2.3, et l'axe vertical représente la tension de l'entité d'assemblage de cellules/piles. Cette courbe doit être incluse dans le rapport d'essai avec les autres conditions d'essai.

La tension de cellule moyenne peut se substituer à la tension de l'entité d'assemblage de piles. En variante, les tensions de cellule mesurées peuvent être tracées par rapport à la densité de courant.

10.4 Essai de durabilité de longue durée

10.4.1 Objectif

Cet essai a pour objectif d'évaluer la dégradation des performances de l'entité d'assemblage de cellules/piles lorsqu'elle est exposée à certaines conditions d'essai pendant une longue durée, et d'examiner l'influence de la température, du courant, de la composition des gaz et de leurs impuretés, ainsi que d'autres facteurs, sur la durabilité de l'entité d'assemblage de cellules/piles.

10.4.2 Méthode d'essai

10.4.2.1 Généralités

Cet essai doit être réalisé en maintenant les conditions d'essai constantes pendant la durée de l'essai, soit en mesurant la variation de la tension de l'entité d'assemblage de cellules/piles à un courant constant, ou en mesurant la variation de la tension de l'entité, ainsi que la résistance totale. La résistance totale doit être mesurée à un certain intervalle (100 h – 500 h) par la courbe I - V spécifiée en 10.2 ou par le spectre d'impédance spécifié en 10.7.

10.4.2.2 Essai de variation de tension

Définir tous les paramètres de commande aux conditions d'essai indiquées et mesurer la tension de l'entité d'assemblage de cellules/piles à intervalles réguliers. Les valeurs mesurées doivent être utilisées pour obtenir la fréquence de variation de tension pendant toute la période d'essai ou la durée spécifique.

10.4.2.3 Essai de variation de tension et de résistance totale

Cet essai peut être effectué au cours de 10.4.2.2.

La méthode suivante doit être utilisée pour mesurer la résistance totale:

- a) Mesurer l'ensemble des caractéristiques $I-V$ entre un courant nul et le courant maximum comme spécifié en 8.2, ou mesurer les caractéristiques $I-V$ partielles au voisinage du courant de maintien, dans les deux cas selon une méthode similaire à celle mentionnée en 10.2.
- b) Déduire la tangente approchée de la courbe $I-V$ au courant de maintien en reliant deux points de la courbe $I-V$ au voisinage du courant de maintien et déterminer la pente de la tangente. Consigner la pente comme étant égale à la résistance totale.

Le choix des points au voisinage du courant de maintien exige un soin particulier. Il convient que les points soient plus proches du courant de maintien lorsque la courbure de la courbe $I-V$ est importante. Il convient que l'incertitude des mesures de tension et de courant soit la plus faible possible.

- c) Après la mesure de la courbe $I-V$, rétablir les valeurs à celles des conditions d'essai d'origine et mesurer la tension jusqu'au cycle de mesure suivant.
- d) Répéter cette mesure à un certain intervalle pendant toute la durée d'essai.

Les résultats doivent servir à calculer la fréquence de variation de la tension et la fréquence de variation de la résistance totale pendant toute la période d'essai ou une durée spécifique incluse dans la période d'essai.

Il est également possible de mesurer l'impédance totale décrite en 10.7 au moment de la mesure de la résistance totale.

10.4.3 Présentation des résultats

Dans le cas de 10.4.2.2, les résultats doivent être exprimés sous forme d'une courbe bidimensionnelle dont l'axe horizontal représente le temps et l'axe vertical représente la tension, et doivent être inclus dans le rapport d'essai accompagnés de la fréquence de variation de la tension et des conditions d'essai. Dans le cas de 10.4.2.3, l'axe vertical doit représenter la tension et la résistance totale, et la courbe doit être incluse dans le rapport d'essai accompagnée de la fréquence de variation de la tension, de la fréquence de variation de la résistance totale et des conditions d'essai.

La tension de cellule moyenne peut se substituer à la tension de l'entité d'assemblage de piles. En variante, les tensions de cellule mesurées peuvent être tracées par rapport au temps.

NOTE Ces résultats peuvent également être représentés comme résistance (ou impédance) spécifique à la surface. Ici, la résistance (ou impédance) spécifique à la surface est égale à la résistance (impédance) mesurée multipliée par la surface d'électrode active.

10.5 Essai de durabilité à cycle thermique

10.5.1 Objectif

Cet essai a pour objectif d'évaluer la durabilité de l'entité d'assemblage de cellules/piles dans des conditions de cycle thermique. Les cycles thermiques doivent relever des spécifications du fabricant.

10.5.2 Méthode d'essai

10.5.2.1 Généralités

Pour cet essai, les conditions d'essai suivantes doivent être indiquées par le fabricant ou déterminées par consultation préalable entre le fabricant et l'évaluateur.

La température de fonctionnement doit être la température des conditions normales d'essai.

- a) nombre de cycles thermiques;
- b) vitesse de refroidissement;
- c) vitesse d'échauffement;
- d) température minimale;
- e) conditions de fonctionnement à la température de fonctionnement;
- f) période nécessaire au maintien de la température de fonctionnement;
- g) période nécessaire au maintien de la température minimale;
- h) période d'essai totale;
- i) débit et composition du ou des gaz aux conditions d'échauffement et de refroidissement, et température minimale, respectivement.

10.5.2.2 Procédure d'essai

Conformément aux conditions d'essai susmentionnées, on doit choisir soit la méthode de mesure de la variation de tension de l'entité d'assemblage de cellules/piles à la température de fonctionnement, ou la méthode de mesure de la résistance totale avec la tension de cette même entité. Suivre la méthode définie en 10.4.2.3 pour la mesure de la résistance totale. La tension doit être mesurée pendant la durée indiquée. Au terme d'une certaine période de température de fonctionnement, la température de l'entité d'assemblage de cellules/piles doit être réduite à la température minimale avec l'entité en circuit ouvert dans les conditions indiquées, et la température minimale doit être maintenue pendant la durée indiquée. La température de l'entité d'assemblage de cellules/piles doit alors être élevée à la température de fonctionnement dans les conditions indiquées et la mesure doit reprendre comme auparavant.

Ces mesures doivent être répétées jusqu'à l'obtention du nombre indiqué. Les résultats obtenus doivent servir à calculer la fréquence de variation de la tension et la fréquence de variation de la résistance totale pendant toute la période d'essai ou une durée spécifique incluse dans la période d'essai.

10.5.3 Présentation des résultats

Les résultats doivent être exprimés sous forme d'une courbe bidimensionnelle dont l'axe horizontal représente soit (a) le temps, soit (b) le nombre de cycles. Les conditions d'essai doivent également être décrites dans le rapport d'essai.

Dans le cas de (a), la tension, la résistance totale (facultatif) et la température de l'entité doivent être tracées sur l'axe vertical.

Dans le cas de (b), la tension et la résistance totale (facultatif) de l'entité doivent être tracées sur l'axe vertical.

10.6 Essai d'aptitude à la fonction de reformage interne

10.6.1 Objectif

Cet essai a pour objectif d'évaluer l'aptitude à la fonction de reformage interne de l'entité d'assemblage de cellules/piles dans les conditions de circuit ouvert ou les conditions

assignées par rapport aux hydrocarbures (HC) tels que du méthane présent dans le gaz d'anode.

10.6.2 Méthode d'essai

10.6.2.1 Généralités

Cet essai doit être effectué selon les recommandations du fabricant ou après consultation entre le fabricant et l'évaluateur concernant la capacité de la cellule/pile au reformage interne des hydrocarbures; certaines entités d'assemblage de cellules/piles peuvent ne pas en être capables.

NOTE Nombre de réactions complexes peuvent se produire avec des gaz d'anode contenant des hydrocarbures selon la composition et les équilibres thermodynamiques. Ces réactions peuvent affecter les gradients de température de la cellule et de la pile.

Cet essai s'applique lorsque le gaz d'anode et le gaz d'anode d'échappement peuvent être échantillonnés sans mélange avec le gaz de cathode ou le gaz de cathode d'échappement.

10.6.2.2 Procédure d'essai

Le gaz d'anode contenant des hydrocarbures doit être fourni à l'entité d'assemblage de cellules/piles. Après que l'entité a atteint l'état stable dans les conditions de circuit ouvert ou les conditions assignées, le gaz d'anode et le gaz d'anode d'échappement doivent être analysés pour déterminer leurs compositions; celles-ci servent à calculer le taux de conversion des hydrocarbures (HC) qui indique la caractéristique de reformage interne.

Le taux de conversion HC pour une valeur HC_j , ξ_j (%) spécifique est calculé comme suit:

$$\xi_j = 100 (f_{HC,j, \text{entrée}} - f_{HC,j, \text{sortie}}) / f_{HC,j, \text{entrée}} \quad (2)$$

où $f_{HC,j, \text{entrée}}$ et $f_{HC,j, \text{sortie}}$ représentent les débits de la valeur HC_j spécifique à l'entrée et à la sortie de l'anode, respectivement, qui sont calculés à partir du débit de gaz d'anode et de sa concentration en hydrocarbures, ainsi que du débit de gaz d'anode d'échappement et de sa concentration en hydrocarbures, respectivement.

10.6.3 Présentation des résultats

Les compositions et les débits du gaz d'anode et du gaz d'anode d'échappement, ainsi que le taux de conversion des hydrocarbures, doivent être décrits dans le rapport d'essai accompagnés des conditions d'essai.

10.7 Essai d'identification des composants de résistance

10.7.1 Objectif

Cet essai a pour objectif principal d'identifier et d'évaluer les composants ohmiques et non ohmiques de la résistance totale de l'entité d'assemblage de cellules/piles.

10.7.2 Méthode d'essai

10.7.2.1 Généralités

La séparation des composants de résistance de l'entité d'assemblage de cellules/piles doit être évaluée au moyen soit de la méthode d'impédance c.a. ou de la méthode d'interruption du courant.

10.7.2.2 Méthode d'impédance électrochimique c.a.

Les conditions d'essai suivantes doivent être déterminées au préalable par la réalisation d'essais préliminaires:

a) Étendue de mesure des fréquences:

Il convient que la fréquence la plus élevée identifie sommairement le point A, et que la fréquence la plus basse identifie sommairement le point C lorsqu'ils sont tracés sur le diagramme d'impédance complexe (voir Figure 2).

b) Nombre de points de mesure:

Un nombre de quatre à vingt points par ordre de fréquences (à répartir uniformément sous forme de logarithmes, dans toute la mesure du possible) doit être exigé; ce nombre doit être suffisant pour identifier clairement la géométrie des courbes d'impédance. Éviter dans toute la mesure du possible les composantes fondamentales et les harmoniques de la fréquence de réseau électrique.

L'essai doit être réalisé au moyen de la procédure suivante:

- a) établir les conditions d'essai;
- b) vérifier que l'état stable a été atteint;
- c) superposer les ondes sinusoïdales c.a. sur le courant ou la tension c.c. et commencer les mesures. Balayer les ondes sinusoïdales c.a. dans la gamme de fréquences indiquée et mesurer l'impédance à chaque fréquence.

L'amplitude du signal c.a. pour la mesure doit permettre d'activer la cellule, mais ne doit pas la polariser de manière exagérée. On peut obtenir l'amplitude par cellule en divisant l'amplitude de tension totale par le nombre de cellules en série. En option, la validité du spectre d'impédance doit être vérifiée par le biais de relations de validation appropriées telles que les relations de Kramers-Kronig (KK) ou Z-hit.

10.7.2.3 Méthode d'interruption du courant

Lorsque cette méthode est appliquée, les caractéristiques d'interruption du courant et la fréquence d'échantillonnage permettant d'évaluer une propriété cible de l'entité d'assemblage de cellules/piles doivent être identifiées au moyen d'essais préliminaires. Des mesures doivent être effectuées après s'être assuré que l'entité est à l'état stable dans les conditions d'essai.

10.7.3 Présentation des résultats

a) Méthode d'impédance c.a.

Les résultats d'essai doivent être exprimés sous forme d'une courbe d'impédance complexe ou d'une courbe de Cole-Cole (indication des fréquences caractéristiques) ou d'une courbe de Bode (tracé des composants d'impédance par rapport au logarithme de la fréquence mesurée). L'impédance par unité de surface calculée par surface active définie en 3.1.2 doit être tracée.

b) Méthode d'interruption du courant

Les formes d'ondes de (densité) de courant et de réponse de tension observées avant et après l'interruption du courant doivent être tracées par rapport à l'axe des temps. La fréquence d'échantillonnage doit permettre d'identifier le composant de résistance ohmique. Le composant de résistance ohmique ainsi obtenu doit être consigné dans un rapport accompagné des conditions d'essai.